

Konstrukce termoizolačních oděvních vrstev

Diplomová práce

Studijní program:

N3106 Textilní inženýrství

Studijní obor:

Oděvní a textilní technologie

Autor práce:

Bc. Andriana Novosad

Vedoucí práce:

doc. Ing. Antonín Havelka, CSc.
Katedra oděvnictví

Konzultant práce:

doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková
Katedra materiálového inženýrství



The construction of insulating layers of clothing

Master's Thesis

Study programme:

N3106 Textile Engineering

Study branch:

Textile and clothing technology

Author:

Bc. Andriana Novosad

Supervisor:

doc. Ing. Antonín Havelka, CSc.

Consultant:

doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková





Zadání diplomové práce

Konstrukce termoizolačních oděvních vrstev

Jméno a příjmení: **Bc. Andriana Novosad**
Osobní číslo: **T17000355**
Studijní program: **N3106 Textilní inženýrství**
Studijní obor: **Oděvní a textilní technologie**
Zadávající katedra: **Katedra oděvnictví**
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši na téma termoizolační vlastnosti textilií a tepelný komfort. Prostudujte také možnosti využití části lidského tepla emitovaného sáláním přes kůži pro zlepšení termoizolačních vlastností textilií.
2. Prostudujte a ověřte metodu hodnocení prostupu převážně radiální složky tepla přes textilií s využitím termokamery. Sledujte stupeň prostupu tepelného záření u vybraných textilií, které tvoří spodní, izolační, reflexní a povrchovou vrstvu zvlášť a v sendviči.
3. Na vybraných oděvních vrstvách testujte míru odrazivosti elektromagnetického vlnění v oblasti 2 až 20 mikrometrů.
4. Stanovte závěry pro vhodné složení termoizolačních vrstev zejména z hlediska tloušťky izolačních vrstev, a také pořadí izolační a reflexní vrstvy ve směru tepelného toku. Komentujte též uživatelské vlastnosti, jako je omak a trvanlivost.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle rozsahu dokumentace
cca 60 stran
tištěná
Čeština



Seznam odborné literatury:

- Cunnington G. R. and Lee S. C.: Radiative Properties of Fibrous Thermal Insulation, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 10, No. 3, 1996, pp. 460-466.
- Modest M. F.: Radiative heat transfer, Academic Press (2013).
- Das A., and Alagirusamy, R.: Science in clothing comfort. Woodhead Publishing India 2010.
- Fan J., and Hunter L.: Engineering apparel fabrics and garments, Woodhead Publishing, Cambridge 2009.
- Basuk M.: Improving the Performance of Human Body with Far Infra-Red Rays Reflecting Textiles, Curr. Trends Fashion Technol Textile Eng. 4, Issue 3 - October 2018.
- DOI: 10.19080/CTFTTE.2018.04.555640.

Vedoucí práce:

doc. Ing. Antonín Havelka, CSc.
Katedra oděvnictví

Konzultant práce:

doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková
Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání práce:

14. prosince 2018

Předpokládaný termín odevzdání: 10. ledna 2020

L.S.

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka

prof. Dr. Ing. Zdeněk Kůs
vedoucí katedry

V Liberci dne 14. prosince 2018

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS/STAG se shodují.

3. ledna 2020

Bc. Andriana Novosad

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu doc. Ing. Antonínu Havelkovi, CSc. a konzultantovi doc. Dr. Ing. Daně Křemenákové za cenné rady, připomínky, trpělivost a odporné vedení mé diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala Ing. Renátě Nemčokové za pomoc s měřením emisivity. A také prof. RNDr. Stanislavu Šťastníkovi, CSc. a Ing. Danielovi Kopkání za pomoc s měřením reflektance na pracovišti ČVUT v Brně.

Ještě bych ráda poděkovala prof. Ing. Jiřímu Militkému za pomoc při konzultacích mé diplomové práce. A v neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině a přátelům za podporu během celé doby studia.



Tento materiál vznikl za podpory Visegrad Fund

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá tepelně izolačními vlastnostmi textiliemi. V rešeršní části je popsána problematika, dosavadní řešení izolačních vrstev a metodiky měření jejich vlastností. V experimentální části jsou zkoumány dvě šarže vzorků, z nichž jsou vytvořeny sendviče s reflexní vrstvou uvnitř. Hlavním cílem experimentální části je stanovení vhodného složení sendviče s optimálními hodnotami tepelně izolačních parametrů při vhodné tloušťce sendviče. Cílem je také nalézt optimální pořadí reflexních a izolačních vrstev ve směru tepelného toku.

KLÍČOVÁ SLOVA:

tepelná izolace, tepelná vodivost, tepelný odpor, tepelný komfort, vedení tepla, proudění tepla, sálání tepla, reflektance, infračervené záření, termovize.

ANNOTATION

The Master's thesis deals with the thermal insulating properties of textiles. The problem, the existing solutions of insulation layers and the methodology of evaluation are described in the research part. The experimental part includes an examination of two batches of samples. The samples are combined into sandwiches with a reflective layer inside of them. The main objective of the experimental part is to determine a suitable sandwich composition with optimal values of thermal insulation parameters at a suitable sandwich thickness. The aim is also to find the optimal order of the reflective and insulating layers in the direction of heat flow.

KEY WORDS:

thermal insulation, thermal conductivity, thermal resistance, thermal comfort, conduction, convection, radiation, reflectance, infrared radiation, thermovision.



Obsah

Seznam použitých veličin a zkratk	9
Úvod	10
1 Rešeršní část	11
1.1 Oděvy do speciálních podmínek	11
1.2 Termofyziologický komfort	11
1.3 Lidská termoregulace a způsoby sdílení tepla	13
1.3.1 Přestup tepla vedením	14
1.3.2 Přestup tepla prouděním	17
1.3.3 Přestup tepla zářením	18
1.3.4 Odvod tepla odpařováním potu a dýcháním	22
1.4 Tepelná izolace	22
1.5 Požadavky na termoizolační oděvy	24
1.6 Přehled existujících termoizolačních vrstev	25
Závěr rešeršní části	28
2. Testovací metody termoizolačních vlastností plošných textilií a oděvů	28
2.1 Přístroj pro měření prodyšnosti vzduchu FX 3300	29
2.2 Alambeta	30
2.3 Termokamera FLIR	31
2.4 Měřicí aparatura na principu integrační koule Mid-IR IntegratIR™	32
3 Experimentální část	33
3.1 Měření vlastností vzorků 1. skupiny	35
3.1.1 Měření plošné hmotnosti, tloušťky a výpočet objemové porozity jednotlivých vrstev	37
3.1.2 Měření prodyšnosti vzduchu jednotlivých vrstev a sendvičů	38
3.1.3 Měření tepelné vodivosti, tepelného odporu a výpočet clo	41
3.1.4 Měření reflektance, transmitance a výpočet absorbance	47
3.1.5 Měření emisivity vrstev MILIFE pomocí termokamery FLIR	52
3.1.6 Měření stupně tepelné izolace záření Ir	56
DÍLČÍ ZÁVĚR 1. SKUPINA	61
3.2 Měření vlastností vzorků 2. skupiny	62
3.2.1 Měření plošné hmotnosti, tloušťky a výpočet objemové porozity jednotlivých vrstev	63
3.2.2 Měření prodyšnosti vzduchu jednotlivých vrstev a sendvičů	63
3.2.3 Měření tepelné vodivosti, tepelného odporu a výpočet clo vybraných sendvičů	64
3.2.4 Měření reflektance, transmitance a výpočet absorbance	66
DÍLČÍ ZÁVĚR 2. SKUPINA	70
ZÁVĚR	71
Seznam použité literatury	72



Seznam použitých veličin a zkratek

Q	Teplo	$[W]$
q	Tepelný tok	$[W/m^2]$
λ	Tepelná vodivost	$[W/(m \cdot K)]$
R_t	Tepelný odpor	$[m^2 \cdot K/W]$
I_c	Tepelná izolace	$[clo]$
h	Tloušťka plošného materiálu	$[m]$
m	Hmotnost	$[g]$
m_s	Plošná hmotnost	$[g/m^2]$
P_o	Objemová porozita	$[-]$
μ	Objemový podíl	$[-]$
ρ_{vl}	Hustota vlákna	$[g/m^3]$
ρ_t	Hustota textilie	$[g/m^3]$
A	Plocha	$[m^2]$
R_e	Reynoldsovo číslo	$[-]$
τ	Čas	$[s]$
V	Rychlost pohybu částic	$[m/s]$
d	Charakteristický rozměr objektu	$[m]$
ν	Dynamická viskozita tekutiny	$[m^2/s]$
α_c	Koeficient přestupu tepla	$[W/m^2 \cdot K]$
λ	Vlnová délka	$[\mu m]$
ε	Emisivita tělesa	$[-]$
T	Teplota tělesa	$[K]$
M	Metabolická výroba tepla	$[W]$
W	Mechanická práce	$[W]$
E	Odvod tepla odpařováním	$[W]$
R	Přenos tepla zářením	$[W]$
C	Přenos tepla prouděním	$[W]$
K	Přenos tepla vedením	$[W]$
S	Odvod tepla dýcháním	$[W]$
c	Rychlost světla	$3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
ρ	Reflektance	$[-]$
τ	Transmitance	$[-]$
a	Absorbance	$[-]$
M_e	Zářivá schopnost tělesa	$[-]$
Q_v	Objemové množství protečené tekutiny	$[-]$
I_r	Stupeň izolace	$[-]$



Úvod

Hlavní funkce oděvu se nikdy nezměnily, ačkoli oblečení v moderním životě má také jiné účely. Od doby primitivní společnosti až dosud je primární účel oblečení zachovávat lidské tělo v teple. Izolační schopnost oblečení za studena závisí na fyzikálních vlastnostech vláken, textilní struktuře, designu oděvu, což vyžaduje návaznost experimentů na každé následující etapě návrhu oblečení do speciálních podmínek.

Dosavadní řešení využití tepla lidského těla pro zlepšení termoizolačních vlastností spočívá v použití kovových membrán (hliník), které jsou neprodyšné a omezují uživatelské vlastnosti textilií (zhoršený omak, komplikovaná údržba atd.). Bude řešena a testována konstrukce prodyšné, odlehčené tenké vrstvy s účinným zpětným odrazem sálavého tepla lidského těla.

Cílem práce je návrh sendvičové oděvní struktury s optimálními vlastnostmi pro použití v podmínkách s nízkými teplotami. Pro docílení daného účelu je, za prvé, byl proveden průzkum teoretických podkladů v oblasti oděvů do speciálních podmínek, termoizolačních vlastností a mechanismů přestupu tepla. Za druhé, byly prostudovány práce, zabývající se podobnou tematikou, a metody hodnocení termoizolačních vlastností. S ohledem na zjištěné údaje a výsledky předchozích měření tepelně izolačních vlastností textilií jsou stanoveny metody a hlavní body navrženého experimentu.



1 Rešeršní část

1.1 Oděvy do speciálních podmínek

Oděv je základní potřebou každého člověka. Výběr oděvu pro konkrétní účel je vždy ovlivněn mnoha faktory, jako jsou sociální, ekonomické, klimatické a psychofyziologické. Jelikož se v této práci zaměřujeme na oděvy do speciálních podmínek, do úvahy se budou brát klimatické a psychofyziologické faktory.

Chlad je nebezpečí pro lidské zdraví, které může negativně ovlivnit fyziologické funkce, pracovní výkony, a dokonce i život člověka [21]. Studené prostředí je charakterizováno kombinací vlhkosti a větru při teplotě nižší než $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, i když pro vojenské účely jsou také relevantní další kategorie, které byly identifikovány: „mokrě studeno“ jako $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; „velmi chladno“ jako -10 až $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; „extrémně chladno“ jako -30 až $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [22,23]. Tyto extrémní atmosférické podmínky mají zásadní vliv na tepelnou regulaci těla.

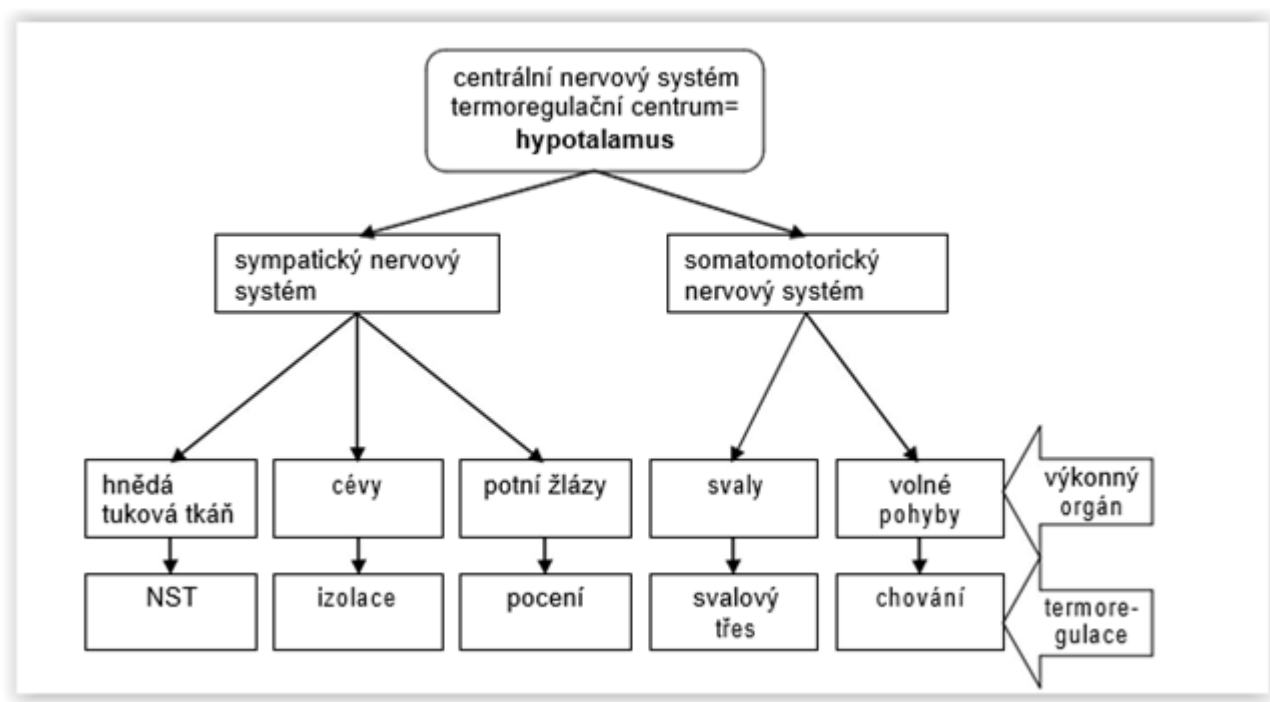
Teplota jádra těla musí být udržována přibližně na $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, zatímco periferní části mohou mít proměnlivé teploty bez škodlivých účinků [24]. K udržení tepla reaguje tělo buď jeho zachováním nebo generováním. Za podmínky tepelné rovnováhy nastává tepelný komfort.

1.2 Termofyziologický komfort

Komfort je komplexní stav mysli, který vyjadřuje pocit pohodlí a závisí na mnoha fyzických, fyzikálně-logických a psychologických faktorech. Mohou být definovány čtyři různé druhy komfortu: tepelný, nebo termofyziologický komfort, senzorický komfort, soulad konstrukce oděvu s tělem a psychologický komfort (estetika).

Tepelný komfort je určen pocitem tepla nebo chladu, stejně jako i pocitem vlhkosti kůže. Vlhkost však nemůže být zjištěna jen pomocí receptorů. Tento pocit je určen jako směr vnímání teploty těla (například chlazení odpařováním) a dotykového vnímání tekutého potu senzory kůže nebo změněné vlastnosti doteku vlhké textilie v blízkosti kůže.

Tepelný komfort nastává v klidu za podmínek tepelné rovnováhy, tj. teplo se ani nevyrábí, ani neztrácí, člověk se nepotí ani nekoná žádnou svalovou práci. Termoregulační systém těla je řízen centrálním nervovým systémem (viz obr.1).



Obrázek 1 Termoregulační systém lidského těla [4]

Teplota těla se liší na různých místech a kolísá v závislosti na fyziologickém stavu těla a okolních podmínkách. Na nejlépe prokrvených částech těla je nejvyšší teplota – 34-36 °C (hlava, břicho, prsa). Na okrajových částech těla – 29-31 °C (nohy, ruce). Nejnižší teplotu – 23-28 °C – mají špička nosu, ušní lalůčky a špičky prstů.

Vnitřní teplota zdravého člověka je udržována na úrovni cca. 37 °C – optimální teplota pro všechny životní funkce. Termoregulační systém (viz obr. 1) udržuje vnitřní teplotu lidského těla v daném teplotním intervalu. V případě, když množství tepla vyprodukované tělem rovná se teple odevzdanému do okolí, vnitřní teplota organismu zůstává konstantní.

Termofyziologický komfort nastává za těchto *optimálních* podmínek:

- teplota pokožky 33–35 °C;
- relativní vlhkost vzduchu 50±10 %;
- rychlost proudění vzduchu 25±10 cm.s⁻¹;
- obsah CO₂ 0,07 %;
- nepřítomnost vody na pokožce [4].

Pro odhad tepelných pocitů a tepelného komfortu je k dispozici norma ISO 7730 [25].



1.3 Lidská termoregulace a způsoby sdílení tepla

Lidské tělo je homeotermické, a proto musí udržovat svou jádrovou teplotu v úzkých mezích okolo 37 ° C. Tělesné buňky, zejména v orgánech a svaích, produkují teplo, které je částečně uvolněno do životního prostředí. Tato metabolická výroba tepla se může do značné míry lišit v závislosti na aktivitě od asi 80 W v klidu až přes 1000 W během nejnáročnějšího úsilí.

Přenos tepla z těla do prostředí probíhá několika způsoby:

- suchý přenos tepla, a to buď vedením (přenos tepla mezi dvěma povrchy ve vzájemném kontaktu), prouděním (výměna tepla mezi povrchem a okolní tekutinou, např. vzduchem nebo vodou) anebo zářením (emise nebo absorpce elektromagnetické vlny);
- odpařování potu;
- přenosu tepla dýcháním.

I když každý způsob se uskuteční pomocí jiného mechanismu, všechny závisí na teplotním rozdílu dvou prostředí.

Tělo musí udržovat konstantní teplotu, proto výroba a ztráta tepla by měla být v ideálním případě stejná. Většinou tento princip může být vyjádřen v rovnici tepelné rovnováhy pro lidské tělo:

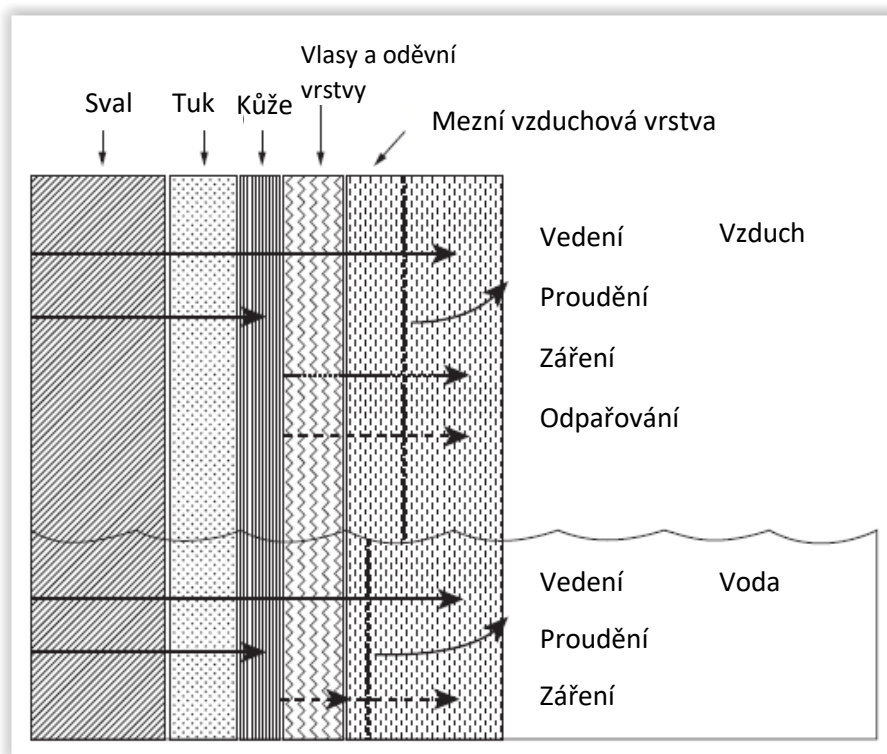
$$M - W = E + R + C + K + S, \quad [W] \quad (1)$$

kde M je metabolická výroba tepla, W je mechanická práce, E je odvod tepla odpařováním potu, R je přenos tepla zářením, C je přenos tepla prouděním, K je přenos tepla vedením a S je odvod tepla dýcháním. Ve skutečnosti se všechny mechanismy přenosu tepla překrývají a mají jiné poměry za různých okolností. Navíc když procesy odvodu tepla jsou omezovány nebo podporovány podmínkami okolí, dochází k výraznému ovlivnění pocitu komfortu [3,4].



1.3.1 Přestup tepla vedením

Organismus člověka ztrácí skoro 5 % tepla vedením, a to při kontaktu kůže s chladnějším prostředím (chodidly, zadní částí těla při sezení nebo spánku). Vedení je hlavní mechanismus přenosu tepla v tenkých vrstvách v oděvních systémech (obr.2).



Obrázek 2 Mechanismy přenosu tepla a vlhkosti z kůže ve vzduchu a vodě [5]

Při přenosu tepla vedením si molekuly, nebo jiné stavební částice látky, předávají kinetickou energii neuspořádaných tepelných pohybů, které jsou předávány z míst o vyšší teplotě do míst o nižší teplotě. Fyzikálně je realizován buď vibrací molekul a následným rozkmitáváním sousedních molekul a v případě vodičů také předáváním elektronů. Vedení tepla probíhá u látek plyných, kapalných i pevných, ve spojitém látkovém prostředí [8].

Schopnost materiálů přenášet teplo vedením charakterizuje součinitel tepelné vodivosti, běžně označován jako **tepelná vodivost** λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$], je fyzikální veličina z oboru termodynamiky. Charakterizuje tepelné chování materiálů a představuje rychlost, jakou se teplo šíří a přenáší z jedné zahřáté části materiálu do jiné. Součinitel tepelné vodivosti lze definovat jako množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový spád teploty. Přitom se předpokládá, že se teplo šíří pouze v jednu směr.



Je to intenzivní, tj. nezávislý na geometrii parametr, materiálová konstanta, která se zjišťuje experimentálně. Tepelná vodivost je koeficientem úměrnosti mezi hustotou tepelného toku q [Wm^{-2}] a teplotním gradientem $\frac{\Delta T}{\Delta x}$, ve Fourierově zákoně:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

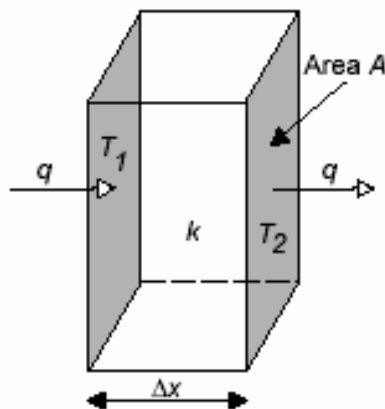
Pro popis jednosměrného přenosu tepla přes těleso s plochou příčného řezu A [m^2] a tloušťkou Δx [m] vlivem tepelné difference ΔT [K] lze vyjádřit ve tvaru:

$$Q = q \cdot A = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot A \quad (3)$$

$$Q = -\lambda \oint_A \text{grad} T \cdot \tau dA \quad (4)$$

$$\frac{Q}{A} \int_{x_1}^{x_2} dx = -\lambda \int_{T_1}^{T_2} dT \rightarrow \frac{Q}{A} = \frac{\lambda}{\Delta x} (T_1 - T_2), \quad (5)$$

kde Q je množství tepla [W], q je tepelný tok [Wm^{-2}], A je plocha příčného řezu [m^2], Δx je tloušťka [m], ΔT je tepelné difference [K], T_1 je teplota na vstupu [K], T_2 je teplota na výstupu [K], λ je tepelná vodivost [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] (viz obr.3).



Obrázek 3 Znáznornění Fourierova zákona [4]

Látky s hodnotami $\lambda < 0,1$ považujeme za tepelné izolátory (např. vzduch), a látky mající $\lambda > 2$ udáváme jako vodiče tepla.

Tepelná vodivost pevných látek se pohybuje kolem $\lambda = 1-5$ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]. Nejmenší tepelnou vodivost v přírodě vykazuje suchý vzduch $\lambda = 0,024$ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] – a proto je základem fungování izolačních materiálů. Tepelná vodivost vody je 25krát vyšší: $\lambda = 0,6$ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$], a proto voda není vítána v textilních materiálech. Nejvyšší tepelná vodivost je



pozorována u kovů (měď, stříbro – 300 [Wm⁻¹K⁻¹], nikl – [Wm⁻¹K⁻¹]). Většina vláknitvorných polymerů má relativně nízkou tepelnou vodivost $\lambda = 0,1-0,5$ [Wm⁻¹K⁻¹].

Důležitým parametrem plošných materiálů je plošný **tepelný odpor** R_t [W⁻¹Km²], nepřímo úměrný tepelné vodivosti:

$$R_t = \frac{\Delta T}{q} = h/\lambda, \quad (6)$$

kde ΔT je rozdíl teplot na vstupu a výstupu z textilie [K], q je tepelný tok [Wm⁻²], h je tloušťka plošného materiálu [m], λ je tepelná vodivost materiálu [Wm⁻¹K⁻¹].

Plošný tepelný odpor je extenzivní veličina. Závisí i na struktuře textilie, ale nejvíc na tloušťce materiálu (při $h = 5$ mm dosahuje své maximální hodnoty).

Celkovou hodnotu tepelného odporu oděvu lze získat jako součet odporů jednotlivých vrstev:

$$R_{CL} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (7)$$

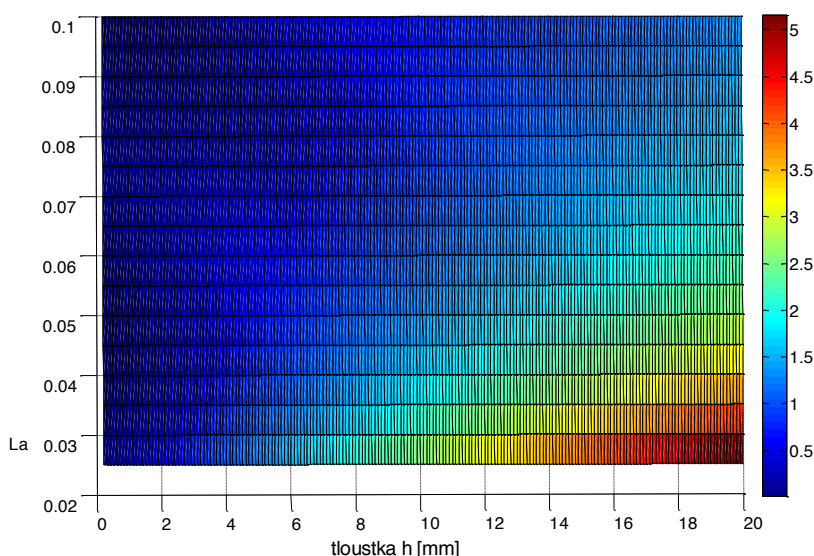
Pomocí veličiny R_t lze určit charakteristiku tepelné izolace I_c , vyjádřenou v jednotkách *clo* [43].

Izolace $I_c = 1 \text{ clo}$ zajišťuje tepelný komfort klidně sedícímu člověku v místnosti s teplotou vzduchu $T_a = 21^\circ\text{C}$, relativní vlhkosti vzduchu $\varphi < 50\%$ a rychlosti proudění vzduchu 0,1 m/s. Obecně platí vztah:

$$I_c = \frac{h}{0,155\lambda} [\text{clo}], \quad (8)$$

kde h je tloušťka plošného materiálu [m], λ je tepelná vodivost materiálu [Wm⁻¹K⁻¹].

Textilie vhodné pro zimní oblečení mají $I_c > 1 \text{ clo}$. Obr.4 zobrazuje závislost hodnoty I_c na tepelné vodivosti materiálu λ [Wm⁻¹K⁻¹] a jeho tloušťce h , určenou z rovnice (6).



Obrázek 4 Závislost hodnoty I_c na tepelné vodivosti $\lambda = La$ a tloušťce textilie h [43]

Hodnota I_c pro zajištění komfortu závisí na podmínkách okolí (teplotě, vlhkosti, rychlosti větru atd.) a intenzitě fyzických aktivit. Níže jsou uvedeny příklady:

- člověk v letních šatech, klid, $W=60 \text{ W/m}^2$, $T=24 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_c = 0,4 \text{ clo}$;
- člověk v těžkém polárním vybavení, klid, $W=60 \text{ W/m}^2$, $T= -6 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_c = 4 \text{ clo}$;
- člověk pomalu jdoucí v lehkém polárním vybavení, $W=120 \text{ W/m}^2$, $T= -25 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_c = 3 \text{ clo}$;
- člověk spící pod polární peřinou, $W=48 \text{ W/m}^2$, $T= -28 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_c = 8 \text{ clo}$;
- člověk rychle jdoucí v těžkém polárním vybavení, $W=180 \text{ W/m}^2$, $T= -80 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_c = 4 \text{ clo}$ [2].

1.3.2 Přestup tepla prouděním

Velký význam v přenosu tepla mezi člověkem a okolím má proudění. Předpokladem přenosu tepla prouděním je spojitě látkové prostředí, probíhá však pouze v kapalinách nebo plynech. Přenos tepla prouděním je tedy prakticky výměna tepelné energie mezi tělesem a okolní tekutinou.

Z hlediska příčin pohybu tekutiny kolem tělesa lze proudění rozdělit na:

- a) přirozené – tekutina se kolem tělesa pohybuje pouze působením změny hustoty v závislosti na změnách teplot v kapalině;
- b) nucené – tekutina se pohybuje působením vnějšího zdroje (např. ventilátoru);



c) kombinované – působení přirozené a nucené konvekce současně.

Transport tepla je realizován částicemi tekutin. Na rozmezí objektu a proudícího prostředí je vytvářena tepelná mezní vrstva o tloušťce δ , ve které je realizován teplotní spád. Příčinou teplotního spádu uvnitř tepelné mezní vrstvy při proudění je vnější tepelný odpor mezní vrstvy R_E :

$$R_E = \frac{1}{\alpha} \quad (9)$$

Tloušťka tepelní vrstvy závisí na druhu proudění:

- je vyšší při laminárním proudění, intenzita proudění je přitom relativně nízká;
- klesá při turbulentním proudění, kdy jednotlivé částice mění směr pohybu a vzájemně se mísí; intenzita proudění je výrazně vyšší.

Podmínkou pro nastání turbulentního proudění je hodnota Reynoldsova čísla: $R_e > 2300$

$$R_e = \frac{V \cdot d}{\nu}, \quad (10)$$

kde R_e je Reynoldsovo číslo [-], V je rychlost pohybu částic [m/s], d je charakteristický rozměr objektu [m], ν je dynamická viskozita tekutiny [m²/s].

Je-li hodnota Reynoldsova čísla: $R_e < 2300$, jde o proudění laminární.

Newtonův zákon vyjadřující tepelný tok přenášený jakýmkoli druhem proudění:

$$q = \alpha_c \cdot (t_1 - t_2), \quad (11)$$

kde q je tepelný tok [Wm⁻²], α_c je koeficient přestupu tepla [W/m²·K], $t_1 - t_2$ je rozdíl teplot materiálu a okolí [K].

Z výpočtového hlediska je přesné určení α_c matematickými postupy dost složité, často se proto využívají empiricky získané tabulkové hodnoty [4].

1.3.3 Přestup tepla zářením

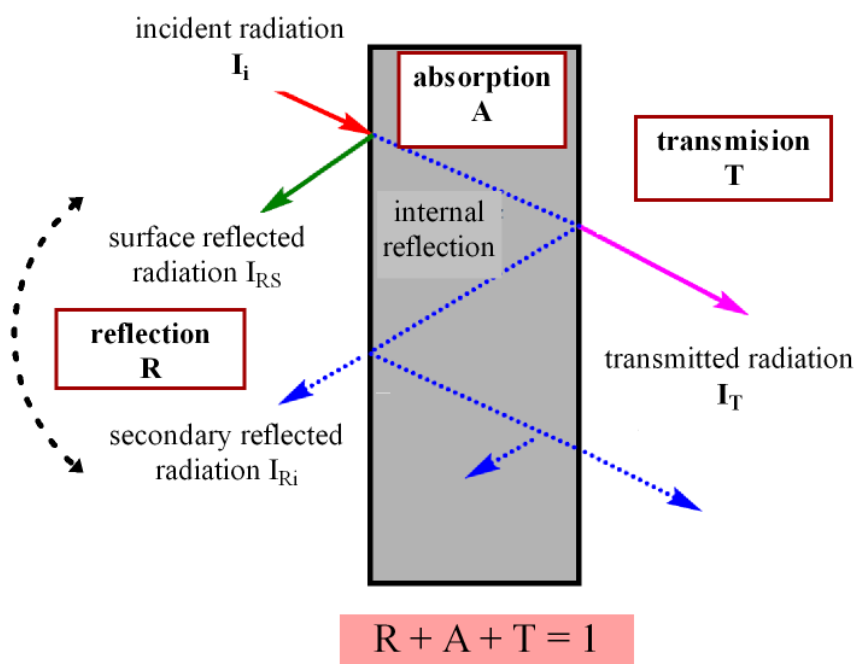
Záření je emise energie pomocí elektromagnetického vlnění, přičemž látkové prostředí není vyžadováno. Což umožňuje přenos energie i ve vakuu, na rozdíl od výše uvedených způsobů přenosu tepla. Rychlost šíření rovná se rychlosti světla $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Podle vlnové délky záření lze třídit (obr.5):



- gama ($\lambda < 124 \cdot 10^{-12}$ m);
- rentgenové RTG (10^{-12} - 10^{-8} m);
- extrémní ultrafialové EUV (1-31 nm);
- ultrafialové UV (200-400 nm);
- optické (400-800 nm);
- infračervené (760 nm-1 mm);
- submilimetrové (0,1-1 mm);
- mikrovlnné (1 mm – 1 m);
- radiové (1 mm – tisíce km) [20].

Tepelná energie zdroje je přeměňována v energii elektromagnetického vlnění. Tyto vlny cestují skrz prostor a narazí se na studené povrchy těles. Tělesa pak vlnění pohlcují a mění zpátky na tepelnou energii nebo teplo. Část tepelného záření se odrazí (reflektance), část prochází objektem (transmitance), a část se pohlcuje (absorbance) (obr.5).

Odraz záření je proces, během něhož se elektromagnetické vlnění vrací zpět buď na hranici dvou medií (povrchový odraz), nebo ve vnitřní části media (objemový odraz).



Obr. 5 Odraz, průchod a pohlcení záření [54]

Reflektance čili odrazivost ρ je definována jako poměr odraženého množství elektromagnetického vlnění k celkovému dopadajícímu množství. **Transmitance** čili propustnost τ je poměr prošlého množství elektromagnetického vlnění k celkovému



dopadajícímu množství. **Absorbance** čili pohltivost α je poměr pohlceného množství elektromagnetického vlnění k celkovému dopadajícímu množství.

Reflektance, transmittance a absorbance nejsou konstantní, protože závisí na tloušťce materiálu, teplotě, charakteru a stavu povrchu, úhlu záření, vlnové délce dopadajícího záření a polarizačních efektech.

Základní rovnice sdílení tepla zářením (Stefanův-Boltzmannův zákon):

$$q = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (12)$$

kde A je vyzařující plocha tělesa [m^2], ε je emisivita tělesa [-], σ je Stefanova–Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, T je teplota tělesa [K].

Emisivita tělesa je poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Pro absolutně černé těleso $\varepsilon = 1$, pro reálná tělesa $\varepsilon < 1$. Emisivita materiálu souvisí s vyzařováním, její hodnota je závislá na vlnové délce světla, teplotě povrchu a směru vyzařování. Emisivita závisí také na typu měřeného materiálu, chemickém složení a struktuře materiálu, stavu materiálu a jeho povrchu (teplotě, drsnosti, stupni zašpinění, stupni oxidace atd).

Při měření emisivity podle Stefanova-Boltzmannova zákona lze nalézt reální hodnotu emisivity ε_F :

$$\varepsilon_F = \varepsilon_Z \left(\frac{T_Z}{T_F} \right)^4, \quad (13)$$

kde ε_F je reální hodnota emisivity [-], ε_Z je nastavená na měřicím zařízení hodnota emisivity ε_Z [-], T_Z je naměřená teplota [K], T_F je skutečná teplota povrchu [K].

Kirchhoffův zákon, nebo zákon záření absolutně černého tělesa, říká, že poměr intenzity vyzařování a pohltivosti (absorptance) absolutně černého tělesa je funkcí pouze jedné proměnné – teploty.

$$\frac{M_e}{\alpha} = f(T), \quad (14)$$

kde M_e je zářivá schopnost tělesa [-], α je absorpční schopnost tělesa [-], T je teplota [K].

Schopnost tělesa emitovat záření je tedy úměrná schopnosti absorbovat záření. Z Kirchhoffova zákona plyne, že těleso absorbuje nejvíce záření těch vlnových délek, které nejsilněji emituje.



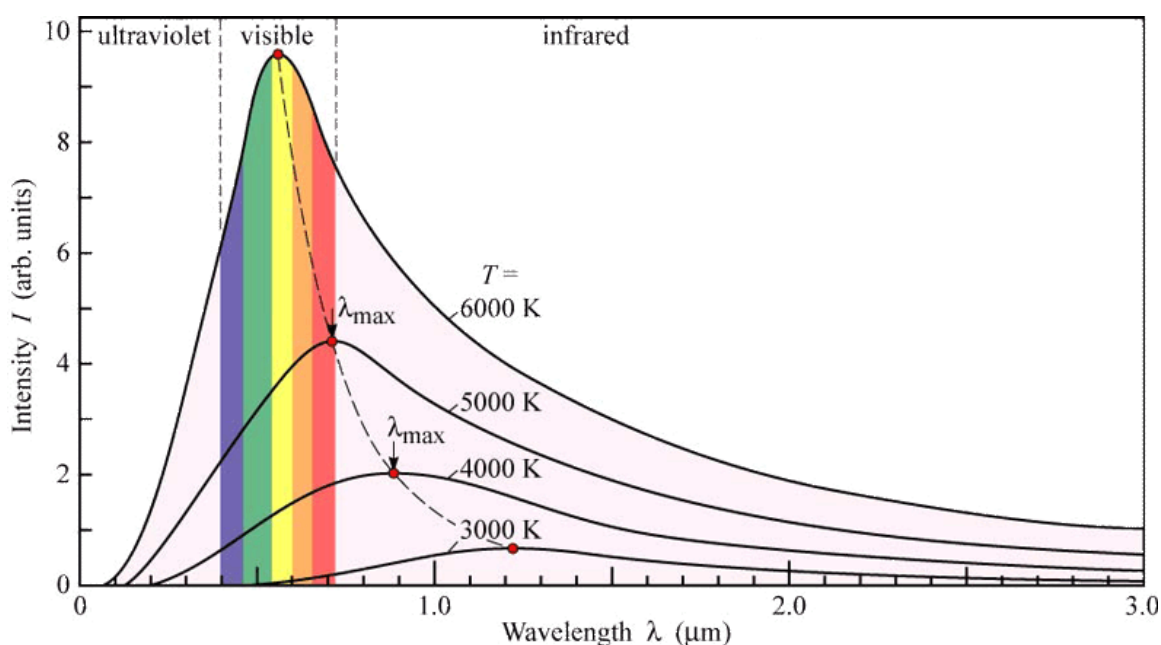
Pro případ sdílení tepla infračerveným zářením (sáláním) mezi dvěma oděvními vrstvami platí vztah pro přenos tepla v propustném prostředí mezi rovnoběžnými rovinami udržovanými na teplotách T_1 a T_2 a s hodnotami emisivity ε_1 a ε_2 :

$$q = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - 1} \quad (15)$$

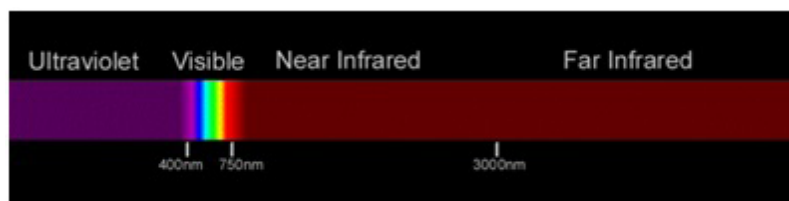
Souvislost absolutní teploty zářiče T [K] a vlnové délky λ_{MAX} [μm] je vyjádřena Wienovým zákonem (obr.6):

$$\lambda_{MAX} \cdot T = 2890 \quad (16)$$

Z něj plyne, že vlnová délka záření λ_{MAX} je nepřímo úměrná teplotě zářiče T .



Obrázek 6 Závislost intenzity záření na vlnové délce [36]



Obr. 7 Spektra záření [45]

Infračervené záření je často považováno za tepelné záření, i když stanoví jen jeho 50 %. V závislosti na podmínkách okolí cca 30 % vyrobeného člověkem tepla emituje přes kůži při vlnových délkách od 4,4 μm s maximem 9,4 μm (oblast vzdáleného infračerveného



záření dále FIR – far infrared) (obr. 7). Bylo stanoveno, že tepelná energie v rozmezí těchto vlnových délek má pozitivní účinky na lidské tělo

Bylo ověřeno, že tato tepelná energie má řadu pozitivních účinků i na lidské tělo. Odraz uvedeného infračerveného záření je podporován keramickými částicemi (slída, turmalín a čedič), částicemi aktivního uhlí, oxidy (Al_2O_3 , SiO_2 , ZnO , MgO , ZrO_2 , TiO_2 , CuO , Cu_2O) a kovy (Fe, Ag, Cu, Zn, Ni) [2,5,45].

1.3.4 Odvod tepla odpařováním potu a dýcháním

Ztráta tepla díky účinkům dýchání pouze asi 10 % z celkového tepelného úbytku, ale při nízkých vnějších teplotách může se zvýšit na více než 30 % (Aschoff, Guèntner a kol., 1971). Pomocí evaporace člověk vydává do okolí až 27 % celkové tepelné ztráty. Skoro dvě třetiny tepla se odpařují z povrchu pokožky, zbytek – z horních cest dýchacích. Při dýchání se vdechovaný vzduch musí ohřát, a proto se ztrácí část tepelné energie. Je to ale velmi malá součást celkové tepelné ztráty

Odpařování probíhá s rychlostí, závisící na rychlosti proudícího vzduchu, rozdílu parciálních tlaků páry v mezní vrstvě a okolí, prodyšnosti vzduchu daného materiálu a velikosti povrchu zvlhčeného potem [2,5].

Ochrana a komfort jsou silně ovlivňovány *vlhkostí*, kterou pokožka vytváří pocením. Je důležité přenést co nejvíce vody z kůže přes oděv, ať už ve formě páry nebo kapaliny. Vlhkost v textiliích snižuje tepelnou izolaci při nahrazování vzduchu, protože voda má 25krát vyšší tepelnou vodivost než vzduch při stejné teplotě. Oděvy jsou stlačené a stárnou, když se namočí. Pokud obsah vlhkosti dosáhne asi 15 %, tepelná izolace je asi 50 % hodnoty suché tepelné izolace. Tento jev se významně neliší mezi různými textiliemi, ale existují velké rozdíly ve vlastnostech absorpce vlhkosti.

Propustnost materiálu je schopnost umožňovat procházet odpařenou vlhkost. Kondenzovaný (kapalný) přenos vlhkosti je také důležitý, což umožňuje, aby kapalina procházela vlákny materiálu na povrchu oděvu, kde se může odpařit. Kapalná kondenzace ve vrstvách v blízkosti povrchu může také zmrznout za chladných podmínek [5].

1.4 Tepelná izolace

Suchý, klidný vzduch je špatný tepelný vodič. Textilní materiály mají v průměru asi desetkrát vyšší tepelnou vodivost než suchý vzduch. Proto tepelná izolace oděvů závisí



na objemu suchého, nepohyblivého vzduchu (mikroklima a mezi vlákny). Přidání oděvních vrstev v chladu zvyšuje objem vzduchu pod oblečením.

Izolační hodnota oděvu závisí hlavně na tloušťce materiálu, schopnosti oděvu zachytit vzduch, který sám působí jako izolátor a na tom, jak je materiál suchý.

Prodyšnost vzduchu je definována jako rychlost proudu vzduchu procházejícího kolmo vzorkem textilie při definovaném rozdílu tlaků na protějších stranách textilie, době a zkušební ploše. Prodyšnost R [mm/s], při konkrétním tlakovém rozdílu, je podle normy ČSN EN ISO 9237 dána vztahem [27]:

$$R = \frac{Q_v}{A} * k \quad (17)$$

kde Q_v je objemové množství protečené tekutiny [m^3/s], A je plocha vzorku, kterou prochází vzduch [m^2], k je koeficient převodu jednotek [-].

Objem vzduchu je také ovlivněn vlastnostmi vlákna, jako je jeho jemnost, zvlnění, délka a tvar. Při hodnocení tepelné izolace textilií je důležité vědět jejich fyzikální parametry, zejména tloušťku, plošnou hmotnost, hustotu, objemovou porozitu.

Pro výpočet plošné hmotnosti m_s [$\frac{g}{m^2}$] platí vztah:

$$m_s = \frac{m}{A} , \quad (18)$$

kde m je hmotnost váženého vzorku [g], A – plocha vzorku [m^2].

Hustotu textilie ρ_t [$\frac{kg}{m^3}$] vyjádřit jako podíl plošné hmotnosti a tloušťky textilie:

$$\rho_t = \frac{m_s}{h} , \quad (19)$$

kde m_s je plošná hmotnost [g/m^2], h je tloušťka [mm].

Pro získání hodnot objemového podílu textilií μ [-] se používá vzorec:

$$\mu = \frac{\rho_t}{\rho_{vl}} , \quad (20)$$

kde ρ_t je hustota textilie [g/m^3], ρ_{vl} je hustota vlákna [g/m^3].

Objemová porozita Po [-] vyjadřuje objemový podíl vzduchu mezi vlákny plošné textilie a je definována vztahem:

$$Po = 1 - \mu , , \quad (21)$$

kde μ je objemový podíl [-].



Pro predikci tepelné vodivosti plošné textilie λ_T je možno použít tzv. dvoufázový model, využívající tepelnou vodivost vláken λ_v a vzduchu λ_a , a také objemovou poróznost textilie Po . Pro sériové uspořádání platí vztah

$$\lambda_{Ts} = \frac{\lambda_a \lambda_v}{Po \lambda_v + (1 - Po) \lambda_a} \quad (22)$$

a pro paralelní uspořádání platí

$$\lambda_{Tp} = Po \lambda_a + (1 - Po) \lambda_v. \quad (23)$$

Otevřeně strukturované tkaniny mají vysokou penetraci vzduchu, zatímco vrstvené nebo potažené tkaniny jsou nepropustné. Návrh oděvu a vzor také ovlivňují propustnost oblečení. Těsně uzavíratelné rukávy, nohavice, dolní okraje a výstřihy zvyšují ochranu proti větru [37].

1.5 Požadavky na termoizolační oděvy

Požadavky na oděvy do speciálních podmínek jsou uvedené v normách TNI CEN/TR 16422, ISO 7730 a BS EN 342 [50, 25, 22].

Požadavky na konstrukci tepelně izolačních oděvů lze shrnout takto (CCOHS, 2008):

- Oděvy s více vrstvami obecně poskytují lepší ochranu než jediný tlustý oděv. Vzduch přítomný v těchto více vrstvách poskytuje lepší izolaci než samotné oblečení. Je také snadné odstranit vrstvy, pokud je člověk aktivní před tím, než je tělo příliš teplé a vytváří příliš mnoho potu, a naopak přidat vrstvy, když je člověk méně aktivní a tělo se ochladí. To umožňuje přizpůsobit oblečení měnícím se klimatickým faktorům.
- Je důležité poskytnout volnější vnější oděv, aby se zabránilo stlačování vnitřního oděvu vnějšími vrstvami, což má za následek snížení izolačních vlastností oděvní sestavy.
- Vnitřní vrstva musí být schopna zajistit izolaci a "nasáknout" vlhkost od pokožky, aby ji udržovala v suchu. Pro tento účel je nejvhodnější termální prádlo vyrobené z *polyesterových* nebo *polypropylenových* tkanin. Vzhledem k tomu, že polypropylen má *nízkou hustotu*, spodní prádlo "fishnet" vyrobené z polypropylenových vláken odvádí pot od pokožky. Vlhkost se snadno odpařuje a zachycuje se na další vrstvě, která je mimo pokožku. Otvary přítomné v struktuře síťoviny přispívají k izolačním vlastnostem tkaniny a druhá vrstva pomáhá pokrýt tyto otvory, aby byla zajištěna správná izolace.



- Další vrstvy v oděvu by měly poskytnout dostatečnou izolaci v náročných povětrnostních podmínkách. Vnější bundy musí obsahovat metody pro zavírání a otevírání určitých částí, jako jsou kapuce, krční oblast, přední část těla a rukávy, které pomáhají řídit, kolik tepla je udržováno nebo uvolněno. Pro dodatečné větrání lze použít síťované kapsy a větrací otvory kolem trupu a pod podpažní podložkou (se zipy nebo suchými zipy).
- Pro práci ve vlhkém prostředí vnější vrstva oblečení by měla být voděodolná. V případě, že není možné chránit pracovní plochu před větrem, je třeba použít snadno odnímatelný bránicí větru oděv. Za extrémně chladných podmínek může být zapotřebí vyhřívaný ochranný oděv.
- Je nesmírně důležité udržet oblečení čisté, protože špína vyplňuje vzduchové buňky ve vláknech a ničí jejich izolační schopnost.

Až do nedávné doby snížení tepelných ztrát bylo dosaženo pomocí těžkých oděvů a/nebo přidáním vrstev oděvu. S nástupem nových technologií a zaváděním inteligentních polymerů a materiálů za posledních 15 let se objevily nové koncepty, které poskytují lepší komfort a/nebo schopnost přežití i v extrémně chladných a drsných podmínkách [2].

1.6 Přehled existujících termoizolačních vrstev

Typicky se termoizolační oděvy skládají ze tří částí: vnější vrstva pro zajištění ochrany před podmínkami okolí spolu s vysokou propustností vzduchu a vlhkosti; střední vrstvu s tepelně izolačními vlastnostmi; a vnitřní vrstvu s tkanou nebo pletenou podšívkou. Všechny tyto tři vrstvy jsou sešity dohromady, aby vytvořily jediný oděv. Textilní tepelný izolátor by měl být schopen zachytávat maximální množství vzduchu.

Je také možné zvýšit tepelný komfort interaktivní izolací pomocí inteligentních materiálů, jako jsou polymery s tvarovou pamětí a materiály s fázovou změnou PCM. Mikro-kapsle PCM se přidávají do textilií, aby absorbovaly tepelnou energii při stoupající teplotě a uvolňovaly teplo při ochlazení. Mikro-kapsle mohou být aplikovány potahováním nebo rozptýlením na tkaninu (Scott, 2009). Neexistuje jednoduché řešení, protože velikost a trvání vlivu vytápění a chlazení PCM v oděvních systémech závisí na několika faktorech spojených s textilem a konstrukcí (McCullough a Shim, 2006).

Slitiny s pamětí tvaru (SMA) a polymery byly vyvinuty tak, aby se vrátily do předem stanovené formy nad danou přechodovou teplotou. Tyto materiály se obvykle používají



k automatické změně tvaru a vytváření vzduchu mezery při změně teploty. Nejvíce zkoumané materiály pro tyto aplikace jsou nitinol, nikl-titanová slitina ve formě drátu a blokové kopolymery polyuretanu ve formě tenkého filmu (Carosio a Monero, 2004; Scott, 2009).

Teplo může být také dopravováno v textiliích pomocí vodivých vláken, přízí nebo tkanin. Vodivé materiály se vyrábějí integrováním kovových drátů do nitě nebo tkaniny, potahováním fólií s kovy nebo vodivými vlákny, nebo přidáním vodivých fillerů (Ueng a Cheng, 2001).

Další "inteligentní" materiály vhodné pro ochranu za studena jsou tepelně-generující vlákna a solární textilie. Jedním z praktických příkladů je Thermolite®, vyrobené společností INVISTA, který zajišťuje dobrou tepelnou izolaci pomocí dutého vlákna založeného na struktuře vlasů ledních medvědů. Vzduch zachycený v těchto vodoodpudivých dutých chloupkách stejně jako mezi vlasy je velmi izolační [46]

Jiným příkladem je Moiscare® od firmy Toyobo, akrylátový olej, který se uvolňuje teplo během absorpce vlhkosti [5, 47].

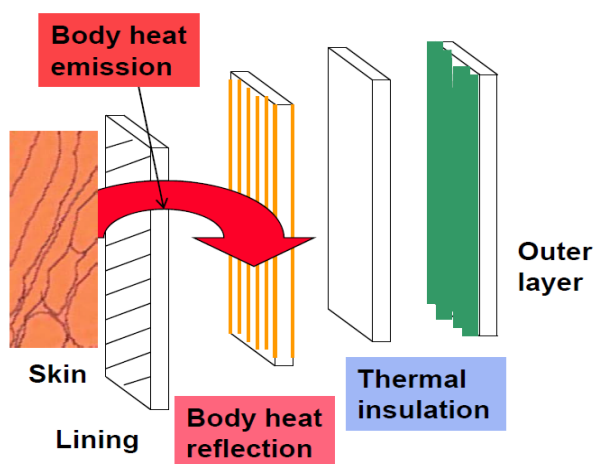
Další způsob tepelné izolace je zpětný odraz infračerveného FIR vlnění vyzařovaného lidským tělem. K vytvoření těchto vláken se používá kombinace polypropylenu a speciální bio-keramiky. Keramika je zodpovědná za vyzařování infračervených paprsků. Základní struktura tohoto vlákna je založena na skutečnosti, že emise energie je součástí lidského těla. Bio-keramika přeměňuje tepelnou energii lidského těla na infračervené paprsky FIR, které vytvářejí hluboké, ale mírné zahřívání. Zdravotní přínosy textilu FIR se pohybují v rozmezí od udržení těla v teple do obnovení fyzických funkcí tím, že se zbaví únavy, zmírňuje bolest svalů, používá se ke zmírnění bolesti artritidy a bronchitidy. Takový typ textilie se může pochlubit také antibakteriálními a deodorantními vlastnostmi. Všechny tyto vlastnosti dělají odrazivé textilie vhodné pro zdravotnické výrobky. Trhy již prodávají kalhoty FIR, spodní prádlo, chrániče kolen, ponožky, polštáře, přehozy na postel, ložní prádlo [45].

Reflexní příkrývka Mylar (the Mylar blanket), která se skládá z pevné plastové vrstvy (často polyethylentereftalát PET) pokryté hustou odrazivou metalickou vrstvou, je neprodyšná, a tak nepohodlná pro každodenní nošení [39]. Technologie Omni-Heat, která představuje řídce umístěné kovové tečky z vnitřní strany oděvů, aby odrážela teplo lidského těla, trpí nízkou odrazivostí a špatným výkonem radiačního ohřevu [40].



Pro optimalizaci odrazivé teploizolační vrstvy byl proveden experiment, kde byla řešen potažený nanopórovitý film Ag s využitím IR-průhledného nanopórovitého polyetylenu nanoPE. Princip spočívá v tom, aby dosáhnout minimální emisivity vnějšího povrchu textilie, což umožňuje potlačení šíření sálavého tepla z lidského těla do okolního prostředí. Byla navržena dvouvrstvá nanofotonická struktura, složená z kovové vrstvy odrážející IR a transparentní IR vrstvy PE s vloženými nanopóry v obou vrstvách, takže má současně minimální IR emisivitu a dobrou prodyšnost. V této nanoporézní metalizované PE soustavě jsou zabudované nanopóry v kovové vrstvě menší než IR vlnová délka, ale větší než molekula vody, což překonává omezení jiných radiačně vyhřívacích textilií, kde je kovový povlak buď příliš hustý na to, aby byl prodyšný (Mylar příkrývka) nebo příliš řídký, aby byl vysoce reflexní (Omni-Heat). Testy nositelnosti navíc ukázaly, že tato textilie je lehká, prodyšná, trvanlivá, omyvatelná a obarvitelná jako normální textilie [42, 38].

Dalším příkladem odrazivé vrstvy je MILIFE – kompozitní netkaná textilie složená ze zkřížených vrstev monofilů. MILIFE mají ve srovnání s tradičními netkanými textiliemi velmi malou tloušťku, vynikající tvarovou stabilitu a mechanické vlastnosti. Příkladem těchto materiálů je produkt MILIFE® společnosti JX Nippon ANCI Corporation, který se skládá ze dvou vrstev zkřížených polyesterových vláken. Obě vrstvy jsou tepelně spojeny dohromady. MILIFE je slibný materiál pro povrchovou metalizaci, protože se skládá z husté sítě monofilů spojených pevnými body. PET materiál může být snadno aktivován hydrolýzou (nejlépe) nebo plazmovou předúpravou. MILIFE se můžou používat jako součást termoizolačního oděvního systému (obr.8).



Obr. 8 Tepelně izolační systém s odrazivou vrstvou [48]



ZÁVĚR REŠERŠNÍ ČÁSTI

Na moderním trhu je prezentováno spoustu termoizolačních oděvů a samotných vrstev, které ne vždy splňují požadované funkce. Standardní termoizolační vrstvy oděvů, chránících proti působení nízkých teplot, využívají vláknenné struktury se systémem uzavřených pórů (vzduchové kapsy) v kombinaci s tloušťkou textilní struktury. Dosavadní řešení využití tepla lidského těla pro zlepšení termoizolačních vlastností spočívá v použití kovových membrán (třeba hliník), které jsou neprodyšné a omezují uživatelské vlastnosti textilií (zhoršený omak, komplikovaná údržba atd.). V experimentální části práce bude řešena a testována konstrukce prodyšné, odlehčené tenké vrstvy s účinným zpětným odrazem sálavého tepla lidského těla.



2 Testovací metody termoizolačních vlastností plošných textilií a oděvů

Přístroje a podmínky pro měření fyzikálních veličin tepelného prostředí jsou určovány podle normy ČSN EN ISO 7726 [49].

Hodnocení tepelně izolačních vlastností probíhá převážně na základě měření termofyzikálních parametrů materiálů, jako jsou: tepelná vodivost, teplotní vodivost nebo tepelný odpor. Principem všech metod je přivedení tepla k textilii a následný přechod tepla zkoumaným materiálem.

Měření je možno provést dvěma způsoby: ve stacionárním stavu – kdy se teplota v závislosti na čase nemění; v nestacionárním stavu – kdy se teplota v závislosti na čase mění. Podle způsobu vytváření teplotního pole ve vzorku se rozlišují metody statické – měření probíhá při stálém tepelném výkonu a dynamické – tepelný výkon se v průběhu měření mění [9].

Pro měření tepelně izolačních vlastností se běžně používají přístroje: Alambeta, analyzátor tepelné vodivosti C-therm TCI, přístroj pro měření tepelné vodivosti podle Fitchovy metody, aerodynamický tunel, potíací torzo, bioklimatické komory, přístroje řady TLP, termovizní systémy, tepelné manekýny [4,10-14].

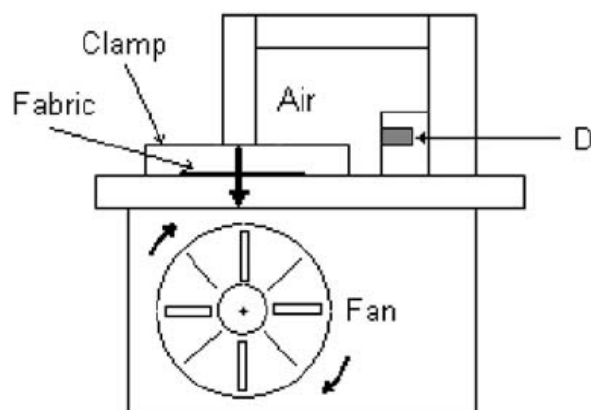
Měření pro danou práci byly prováděna na následujících přístrojích: FX 3300, Alambeta, termokamera FLIR a měřicí aparatura na principu integrační koule Mid-IR IntegratIR™.

2.1 Přístroj pro měření prodyšnosti vzduchu FX 3300

Prodyšnost na přístroji FX 3300 (obr.9) je měřena jako rychlost proudícího vzduchu přes vzorek textilie za specifikovaných podmínek pro měřenou plochu, tlakový spád a dobu. Zařízení je automatizované, hodnota prodyšnosti je zobrazena podle zvoleného tlakového



rozdílu a jednotek měření. Během měření je potřeba ručně provádět změny rozsahu průtokoměru.



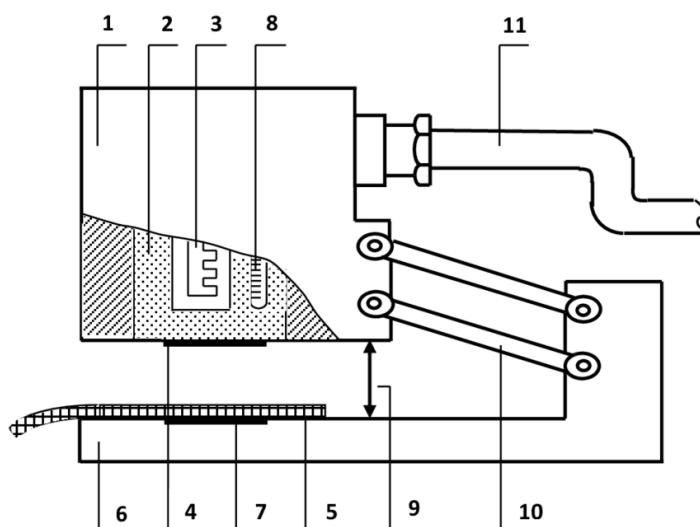
Obr. 9 Schematické zobrazení FX 3300

Postup měření a nastavení hodnoty tlakového spadu jsou regulovány normou ČSN EN ISO 9237 [27].

2.2 Alambeta

Přístroj Alambeta (obr.10) měří termofyzikální parametry textilií, a to jak stacionární tepelně izolační vlastnosti (tepelný odpor, tepelná vodivost), tak i vlastnosti dynamické (tepelná jímavost, tepelný tok). Jedná se o poloautomatický počítačem řízený přístroj, který je zároveň s měřením schopen vyhodnocovat statistické hodnoty naměřených údajů.

Měření se řídí podle interní normy č. 23-304-02/01 [30].



Obr. 10 Schematické zobrazení přístroje Alambeta

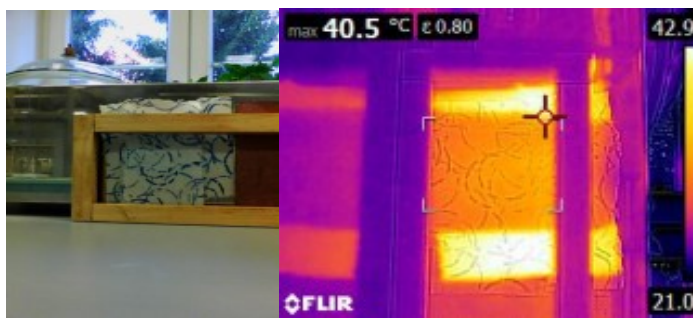


2.3 Termokamera FLIR

Pro hodnocení radiační složky přenosu tepla byla použita metodika měření stupně tepelné izolace radiačního záření. Pro měření byl připraven prototyp zařízení, jehož schéma je na obr. 11-12. Teplota povrchu termostatu je volena 40°C. Jako podkladová vrstva (vzdálená 3 mm od desky termostatu) je volena tkanina Vs/Ba/PES, která prakticky neovlivňuje radiační přenos tepla. Teplota podkladové vrstvy je T_p .



Obrázek 11 Měření radiační složky tepelného záření



Obrázek 12 Radiační propustnost podkladové vrstvy

Na tuto podkladovou vrstvu se upevňují do rámečku měřené vzorky. Jejich povrchová teplota T_f je měřena kamerou FLIR po 2 min stabilizace. Vzdálenost termokamery od rámečku je 40 cm. Snímá se také teplota místnosti T_a . Pro stupeň izolace I_r radiační složky tepelného záření je navržen vztah:

$$I_r = \frac{T_p - T_f}{T_p - T_a}, \quad (24)$$

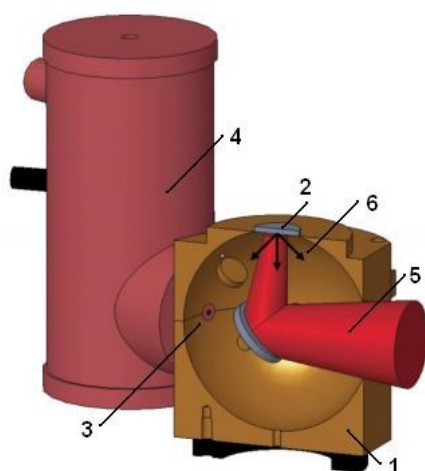
kde T_p – teplota podkladové vrstvy [°C], T_f – povrchová teplota měřeného vzorku [°C], T_a – teplota místnosti [°C].



Pro textilie, které úplně propouštějí radiační tepelné záření, je $I_r = 0$, neboť teplota podkladové vrstvy T_p je stejná jako povrchová teplota textilie T_f . Pro úplně tepelně izolující materiály je $I_r = 1$ a v tomto případě povrchová teplota textilie odpovídá teplotě okolí T_a [48].

2.4 Měřicí aparatura na principu integrační koule Mid-IR IntegratIR™

Pracoviště THD FAST VUT v Brně disponuje měřicí aparaturou na principu integrační koule Mid-IR IntegratIR™ od společnosti PIKE Technologies™. Zařízení je určeno k měření difúzní reflektance materiálů, jedná se o modulární nástavec infračerveného spektroskopu (FTIR metoda). Principem zkoušky je proměření vzorku na odraz paprsků infračerveného záření s rozsahem vlnové délky od 2 do 20 μm . Tento rozsah pokrývá cca 74,5 % z celkového spektra tepelného vyzařování předmětů s teplotou 30°C. Paprsek dopadá na vzorek pod úhlem 8° a interaguje s jeho povrchem. Část dopadající energie je pohlcena a část odražena. Odražená složka záření je dále difúzně odrážena od povrchu integrační koule a jeho hodnoty pro jednotlivé vlnové délky jsou zaznamenány na dusíkem chlazeném měřícím senzoru (čip na bázi slitiny rtuti, kadmia a teluridu) – schéma viz obrázek 33. Chyba měření uváděná výrobcem pro MCT detektor činí asi 1,5 % [13].



- 1 - těleso integrační sféry
- 2 – měřený vzorek (etalon)
- 3 – senzor
- 4 – nádoba na kapalný dusík
- 5 – původní paprsek IR záření
- 6 – difúzní rozptyl paprsku na vzorku

Obrázek 33 Schéma měřicí aparatury, princip její funkce a popis integrační sféry [13]



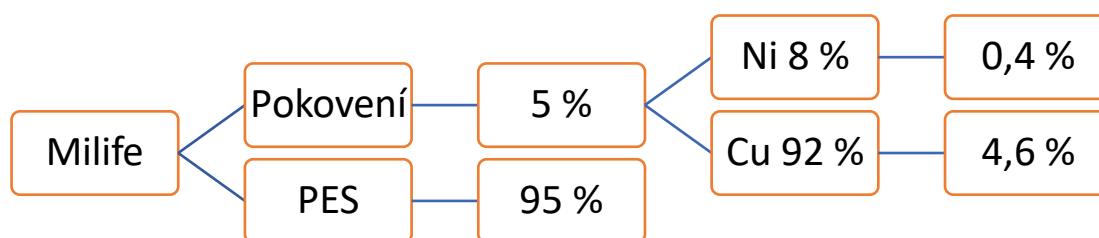
3 Experimentální část

Hlavním cílem experimentální části je stanovení vhodného složení sendviče s optimálními hodnotami tepelně izolačních parametrů při vhodné tloušťce sendviče. Cílem je také nalézt optimální pořadí reflexních a izolačních vrstev ve směru tepelného toku.

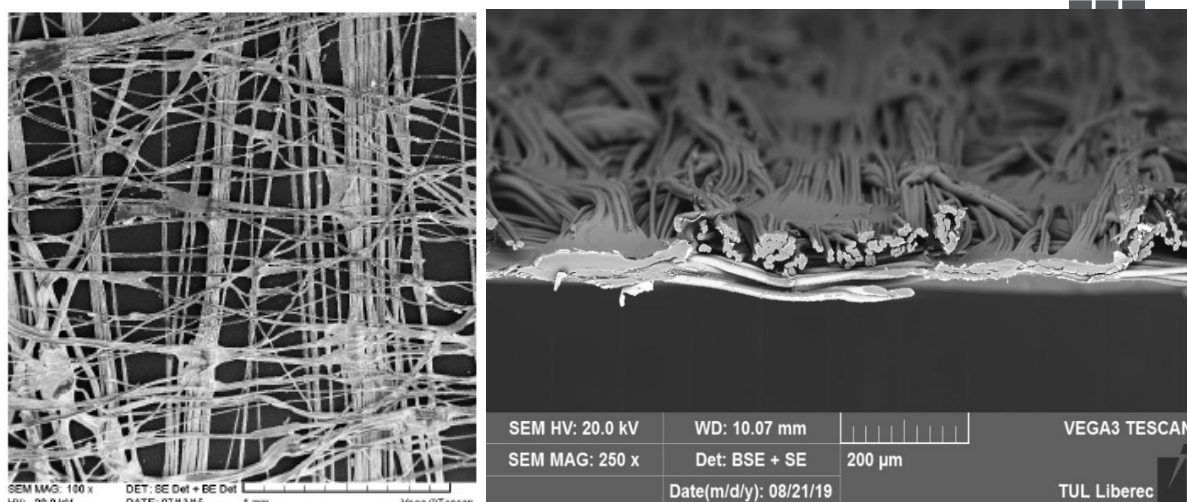
Experimentální část obsahuje měření dvou šarží vzorků vyvinutých ve spolupráci Večerník a.s., Bochemie a.s., Sintex s.r.o., Inotex s.r.o. a TUL za podpory projektu SPETEX CZ.01.1.02/0.0/0.0/16_079/0008314 Ministerstvo průmyslu České republiky. Vzorky byly dostupné postupně, zejména pokovená netkaná textilie MILIFE, jejíž technologie výroby byla postupně optimalizována z hlediska přilnavosti pokovené vrstvy, antikorozi ochrany a stálosti v praní a oděru. První skupina vzorků byla vytvořena na laboratorní lince a druhá skupina vzorků na provozní lince Bochemie a.s.

Do první skupiny patří laboratorní vzorky – rezné a pokovené netkané textilie MILIFE bez ochranné vrstvy, z nichž byly postupně optimalizovány komerční vzorky – pokovené MILIFE s ochrannou vrstvou a bez, které tvoří druhou skupinu. Pokovení MILIFE se zpravidla skládá z mědi (92 %) a niklu (8 %) a činí 5 % z celkové jeho hmotnosti (viz obr.14 a 15).

U obou skupin byly měřena plošná hmotnost, tloušťka, prodyšnost vzduchu, tepelná vodivost, tepelný odpor, reflektance, transmitance a absorbance. U první skupiny byly navíc měřeny emisivita a stupeň izolace radiační složky přestupu tepla.

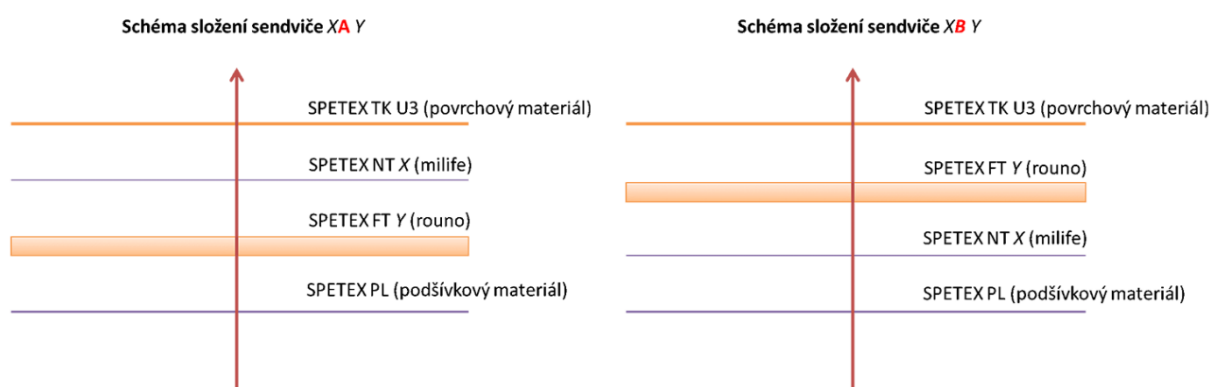


Obr.14 Schematické zobrazení struktury MILIFE



Obr.15 Mikroskopické zobrazení struktury MILIFE

Z jednotlivých vrstev byly vytvořeny sendviče typů A a B (viz obr.16). Proměnná X nabývá hodnoty poslední číslice z názvu MILIFE, proměnná Y označuje plošnou hmotnost rouna v sendviči.



Obr.16 Struktura sendvičů typů A a B




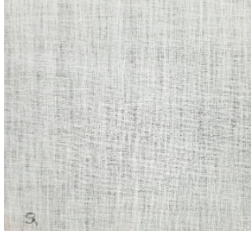


Předpokládá se, že změna posloupnosti termoizolačních vrstev uvnitř sendviče ovlivní průchod tepla, zejména jeho radiační složky. Rozdíly mezi typem A a B budou hodnoceny v dalších kapitolách.



3.1 Měření vlastností vzorků 1. skupiny

Základní parametry laboratorních vzorků jsou uvedené v tab.1.

Tab. 1 Popis experimentálních vzorků 1. skupiny

Obrázek	Název materiálu	Struktura a složení	Funkce	Plošná hmotnost nominální m_{s0} , g/m ²
	SPETEX TK U3	PES tkanina, plátno, ripstop, $D_o = 16 + 2 * 2$ $D_{\dot{u}} = 16 + 2 * 2$	Vrchová vrstva	74
	SPETEX NT 00	MILIFE režná	Prostřední – termoizolační – vrstva	10
	SPETEX NT 08	MILIFE pokovená: 8 % Ni/ 92 % Cu		10
	SPETEX NT 05	MILIFE režná		30
	SPETEX NT 07	MILIFE pokovená: 8 % Ni/ 92 % Cu		30
	SPETEX FT 100	Objemová netkaná PES rouna různých gramáží, pojená akrylovou disperzí		100



	SPETEX FT 150			150
	SPETEX FT 200			200
	SPETEX FT 300			300
	SPETEX FT 400			400
	SPETEX PL 05	PES pletenina, filet	Podšívka	100



3.1.1 Měření plošné hmotnosti, tloušťky a výpočet objemové porozity jednotlivých vrstev

Byla měřena plošná hmotnost, tloušťka a vypočtena hustota, objemový podíl vláken a objemová porozita dle vztahů v kap. 1.4. Tloušťka byla měřena pomocí tloušťkoměru s přitlakem 1 kPa. Výsledky měření a výpočtů jsou uvedené v tab.2.

Tab. 2 Parametry jednotlivých vrstev

Název materiálu	Struktura a, složení	Tloušťka h , mm	Plošná hmotnost nominální m_{s0} , g/m ²	Plošná hmotnost vypočtená m_s , g/m ²	Hustota textilie ρ_t , kg/m ³	Objemový podíl μ , -	Objemová porozita P_o , -
SPETEX TK U3	PES tkanina, plátno, ripstop	0,117	74	75,22	642,91	0,473	0,527
SPETEX NT 00	MILIFE režná	0,060	10	12,67	211,12	0,155	0,845
SPETEX NT 08	MILIFE pokovená : 8 % Ni/ 92 % Cu	0,064	10	12,09	189,03	0,109	0,891
SPETEX NT 05	MILIFE režná	0,103	30	30,65	299,06	0,220	0,780
SPETEX NT 07	MILIFE pokovená : 8 % Ni/92 % Cu	0,122	30	34,01	278,79	0,160	0,840
SPETEX FT 100	Objemová netkaná	6,480	100	104,47	16,16	0,012	0,988
SPETEX FT 150	PES rouna	11,580	150	167,83	14,49	0,011	0,989
SPETEX FT 200	různých gramáží,	13,750	200	209,80	15,26	0,011	0,989
SPETEX FT 300	pojená akrylovou disperzí	19,380	300	319,92	16,51	0,012	0,988
SPETEX FT 400		29,000	400	414,96	14,31	0,011	0,989
SPETEX PL 05	PES pletenina, fílet	0,212	100	106,44	502,08	0,369	0,631

Pro vzorky MILIFE, které jsou pokovené, takže nemají homogenní složení, objemový podíl μ [–] byl vypočten podle vztahu:

$$\mu = \frac{\rho_t}{k_1 \cdot \rho_{vl} + k_2 \cdot \rho_{k1} + k_3 \cdot \rho_{k2}}, \quad (25)$$



kde k_1 je podíl základního vlákna plátna [-], ρ_{vl} je hustota základního vlákna [g/m^3], k_2 je podíl prvního kovu [-], ρ_{k1} je hustota prvního kovu [g/m^3], k_3 je podíl druhého kovu [-], ρ_{k2} je hustota druhého kovu [g/m^3].

Hustota základního vlákna PES $\rho_{vl} = 1360 \text{ kg/m}^3$. Hustota niklu $\rho_{k1} = 8908 \text{ kg/m}^3$. Hustota mědi $\rho_{k2} = 8960 \text{ kg/m}^3$.

3.1.2 Měření prodyšnosti vzduchu jednotlivých vrstev a sendvičů

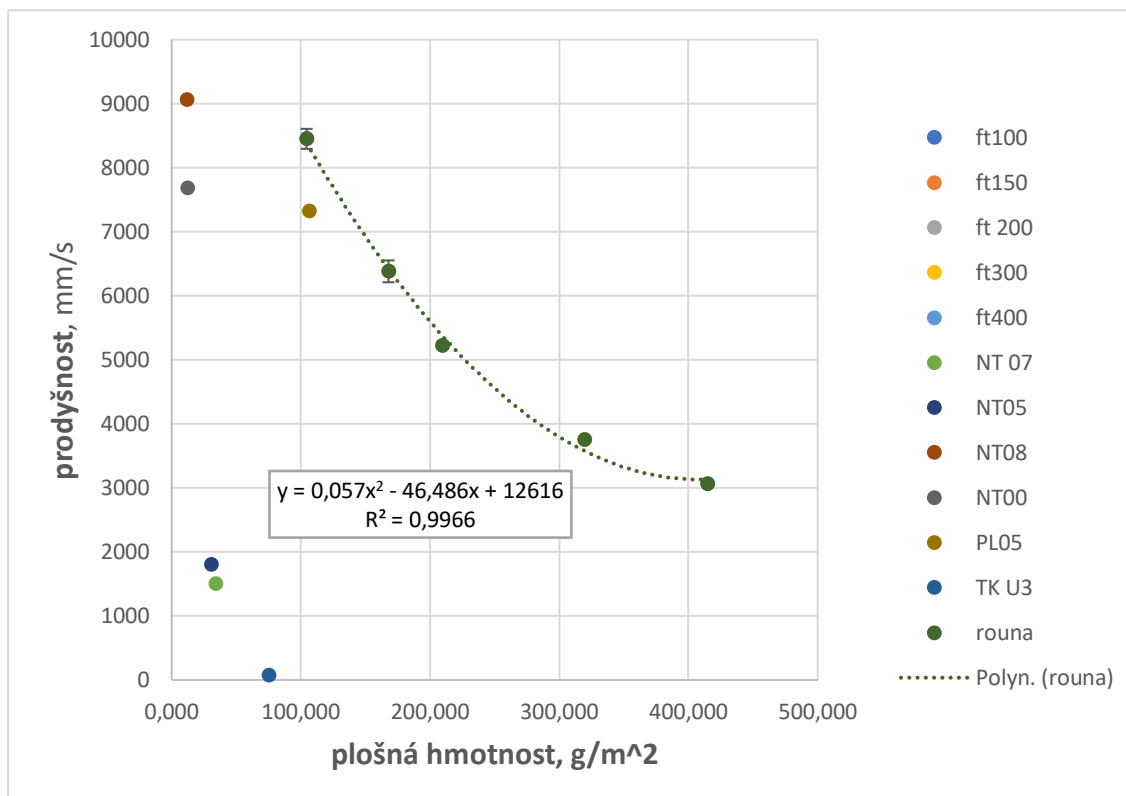
Prodyšnost vzduchu byla měřena pomocí přístroje FX 3300 s tlakovým spádem $P=100$ Pa podle normy ČSN EN ISO 9237 [27]. Teplota vzduchu v laboratoři byla $t=20,1-20,9$ °C, vlhkost vzduchu $\varphi=52$ %. K posouzení variability hodnot prodyšnosti a statistické závislosti rozdílů u jednotlivých vzorků, bylo každé měření prováděno minimálně 5krát. Byly vypočteny průměrné hodnoty prodyšnosti (odhady středních hodnot) a 95% intervaly spolehlivosti středních hodnot. Výsledky měření jsou uvedené v tab.3 a na obr 17.

Tab.3 Prodyšnost vzduchu jednotlivých vrstev

Název vzorku	Prodyšnost vzduchu R [mm/s]	Spodní mez IS [mm/s]	Horní mez IS [mm/s]
TK U3	71,3	70,2	72,3
TK U3_A	71,6	68,8	74,3
TK U3_B	71,1	69,8	72,4
NT 00 režná, 10 gm^{-2}	7686	7362	8010
NT 08 pokovená, 10 gm^{-2}	9067	8734	9400
NT 05 režná, 30 gm^{-2}	1807	1719	1895
NT 07 pokovená, 30 gm^{-2}	1503	1436	1569
NT 07 pokov. A	1484	1389	1579
NT 07 pokov. B	1533	1412	1655
FT 100	8450	8294	8606
FT 150	6381	6211	6551
FT 200	5229	5172	5286
FT 300	3752	3706	3798
FT 400	3067	3049	3086
PL 05	7328	7273	7384



Během měření prodyšnosti byl zkoumán průchod vzduchu materiály směrem k tělu člověka (A) a směrem od těla ven (B). Bylo zjištěno, že se intervaly spolehlivosti průměrů prodyšností překrývají, rozdíl mezi hodnotami není statisticky významný, a tak prodyšnost vrstev můžeme považovat za stejnou v obou směrech.



Obr.17 Vliv plošné hmotnosti na prodyšnost jednotlivých vrstev

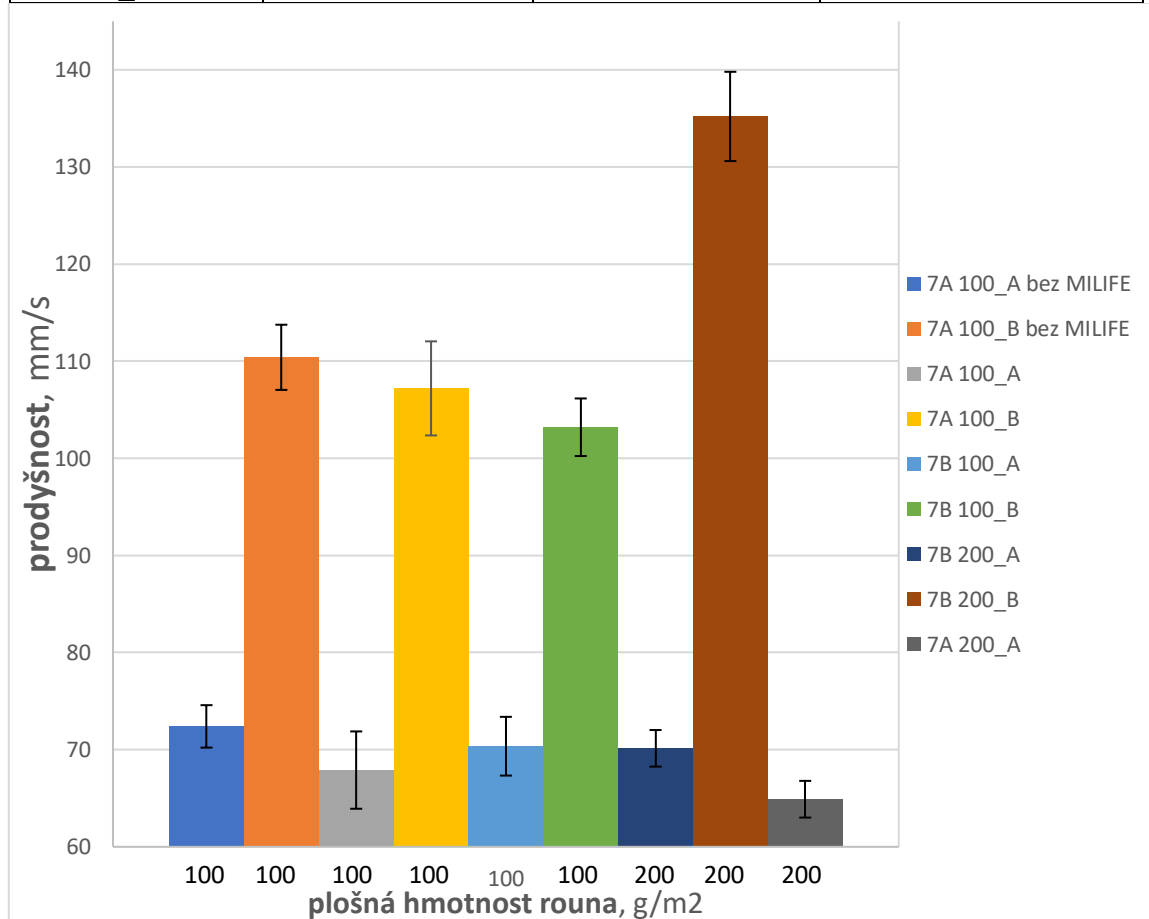
Z grafů je patrné, že s rostoucí plošnou hmotností, klesá prodyšnost, jak u textilií MILIFE, tak i u netkaných textilií – roun. U MILIFE s plošnou hmotností 30 g/m² je vidět výrazný rozdíl mezi hodnotami prodyšnosti u pokovené a režné vrstvy.

Výsledky měření prodyšnosti vzduchu sendvičů jsou uvedené v tab.4 a na obr.18.



Tab.4 Prodyšnost vzduchu sendvičů

Název sendviče	Prodyšnost vzduchu R [mm/s]	Spodní mez IS [mm/s]	Horní mez IS [mm/s]
7A 100_A bez MILIFE	72,4	70,2	74,6
7A 100_B bez MILIFE	110,4	107,0	113,8
7A 100_A	67,9	63,9	71,9
7A 100_B	107,2	102,4	112,0
7B 100_A	70,36	67,3	73,4
7B 100_B	103,2	100,2	106,2
7B 200_A	70,14	68,3	72,0
7B 200_B	135,2	130,6	139,8
7A 200_A	64,9	63,0	66,8



Obr.18 Porovnání prodyšnosti sendvičů

Výsledky ukazují, že změna hodnoty prodyšnosti při otočení celého sendviče, tj. změna směru proudícího vzduchu, je statisticky významná (viz tab.4 a obr.18). U sendvičů typů A (MILIFE se nachází mezi rounem a svrchní vrstvou) a B (MILIFE se nachází mezi



podšívkou a rounem) rozdíl mezi hodnotami prodyšnosti není statisticky významný. Odstranění vrstvy MILIFE nevede k významné změně. Na základě tohoto pozorování lze říct, že prodyšnost vzduchu je hlavním způsobem ovlivněna strukturou podšívky a vrchové vrstvy.

Největší hodnota prodyšnosti byla nalezena u sendviče 7B 200_B: $R = 135,2 \text{ mm/s}$.

3.1.3 Měření tepelné vodivosti, tepelného odporu a výpočet clo

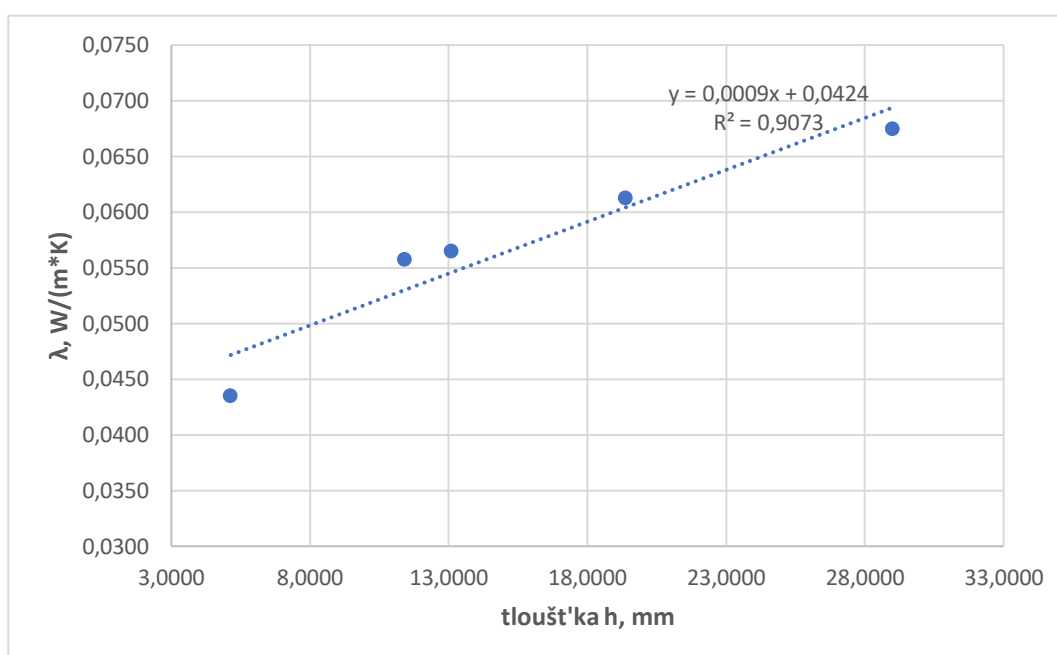
Měření bylo prováděno pomocí přístroje Alambeta podle interní normy č. 23-304-02/01 [30]. Měření probíhalo při běžně nastavených parametrech přístroje s přítlakem $P=200 \text{ Pa}$, při teplotě vzduchu v laboratoři $t=22,8\text{-}23,2 \text{ °C}$ a vlhkosti vzduchu $\phi=39 \text{ %}$. Každé měření prováděno pět až desetkrát. Byly vypočteny průměrné hodnoty a 95% intervaly spolehlivosti středních hodnot. Výsledky měření jsou uvedené v tab.5 a na obr.19-20.

Tab.5 Výsledky měření jednotlivých vrstev

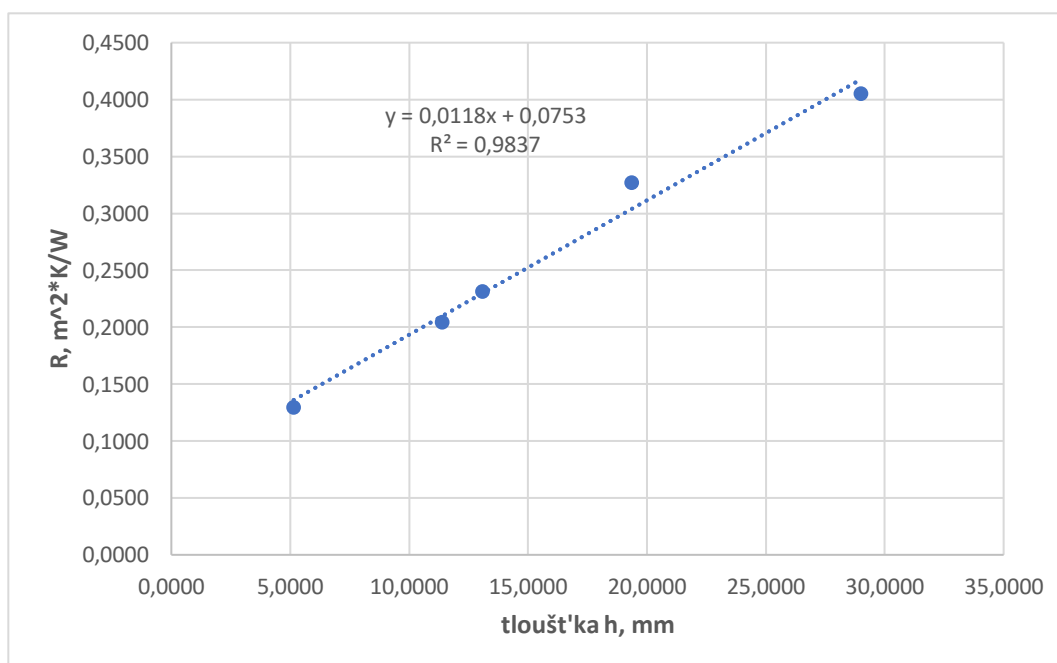
Název vzorku	Tloušťka [mm]	Měrná tepelná vodivost $\lambda \text{ [Wm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$	SM IS λ	HM IS λ	Plošný odpor vedení tepla $R_t \text{ [W}^{-1}\text{Km}^2\text{]}$	SM IS R_t	HM IS R_t	Izolace $I_c \text{ [clo]}$
TK U3	0,12	-	-	-	0,022	0,021	0,024	0,14
FT 100	5,81	0,0435	0,0429	0,0441	0,132	0,131	0,133	0,85
FT 150	11,40	0,0558	0,0551	0,0566	0,205	0,203	0,207	1,31
FT 200	13,10	0,0565	0,0559	0,0572	0,245	0,241	0,250	1,58
FT 300	19,38	0,0613	0,0605	0,0621	0,314	0,313	0,315	2,03
FT 400	29,01	0,0675	0,0669	0,0681	0,405	0,401	0,409	2,61
PL 05	0,19	-	-	-	0,028	0,023	0,033	0,18

Vrstvy s tloušťkou $h < 0,5 \text{ mm}$ nelze na uvedeném zařízení měřit jednotlivě, protože vychází tepelná vodivost na úrovni tepelné vodivosti vzduchu. Pro výpočet hodnoty plošného odporu bylo měřeno více vrstev stejného vzorku a výsledek děleno počtem vrstev (viz rovnice 7, kapitola 1.3.1).

U roun byla sledována závislost měrné tepelné vodivosti a plošného odporu vedení tepla na tloušťce (viz obr.19-10).



Obr. 19 Závislost tepelné vodivosti roun na tloušťce



Obr. 20 Závislost tepelného odporu roun na tloušťce

Jak je patrné z grafů, s růstem prodyšnosti roun klesají jak tepelný odpor, tak i tepelná vodivost. Důvod je v tloušťce, kvůli struktuře roun a jejich stlačitelnosti během měření.

S cílem objevit optimální pořadí a tloušťku termoizolační vrstvy byly měřeny bez podšívky a vrchové vrstvy. Hodnoty clo celých sendvičů byly následně dopočítány.



Výsledky měření termoizolačních vrstev a výpočet clo jsou uvedené v tab. 6-8 a na obr. 21-23.

Tab.6 Výsledky měření pro kombinace NT 08 a roun

Kombinace vrstev	Měrná tepelná vodivost λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	SM IS λ	HM IS λ	Plošný odpor vedení tepla R_t [W^{-1}Km^2]	SM IS R_t	HM IS R_t	Izolace I_c [clo]
Směr tepelného toku: od MILIFE k rounu							
NT08+FT100	0,0456	0,0451	0,0461	0,138	0,134	0,142	0,89
NT08+2xFT100	0,0506	0,0503	0,0509	0,216	0,209	0,223	1,39
NT08+3xFT100	0,0527	0,0521	0,0534	0,285	0,279	0,291	1,83
NT08+2xFT150	0,0658	0,0652	0,0664	0,348	0,343	0,353	2,24
NT08+FT200	0,0565	0,0560	0,0570	0,259	0,252	0,267	1,67
NT08+2xFT200	0,0680	0,0674	0,0686	0,410	0,406	0,414	2,65
NT08+FT400	0,0681	0,0676	0,0686	0,433	0,426	0,440	2,79
Směr tepelného toku: od rouna k MILIFE							
FT100+NT08	0,0437	0,0432	0,0442	0,128	0,125	0,131	0,83
2xFT100+NT08	0,0513	0,0509	0,0517	0,215	0,211	0,219	1,39
3xFT100+NT08	0,0524	0,0517	0,0531	0,292	0,285	0,299	1,88
2xFT150+NT08	0,0647	0,0644	0,0650	0,353	0,349	0,357	2,28
FT200+NT08	0,0581	0,0573	0,0589	0,255	0,251	0,259	1,65
2xFT200+NT08	0,0706	0,0703	0,0709	0,414	0,411	0,417	2,67
FT300+NT08	0,0606	0,0601	0,0612	0,320	0,314	0,326	2,07
FT400+NT08	0,0647	0,0644	0,0650	0,419	0,414	0,425	2,70

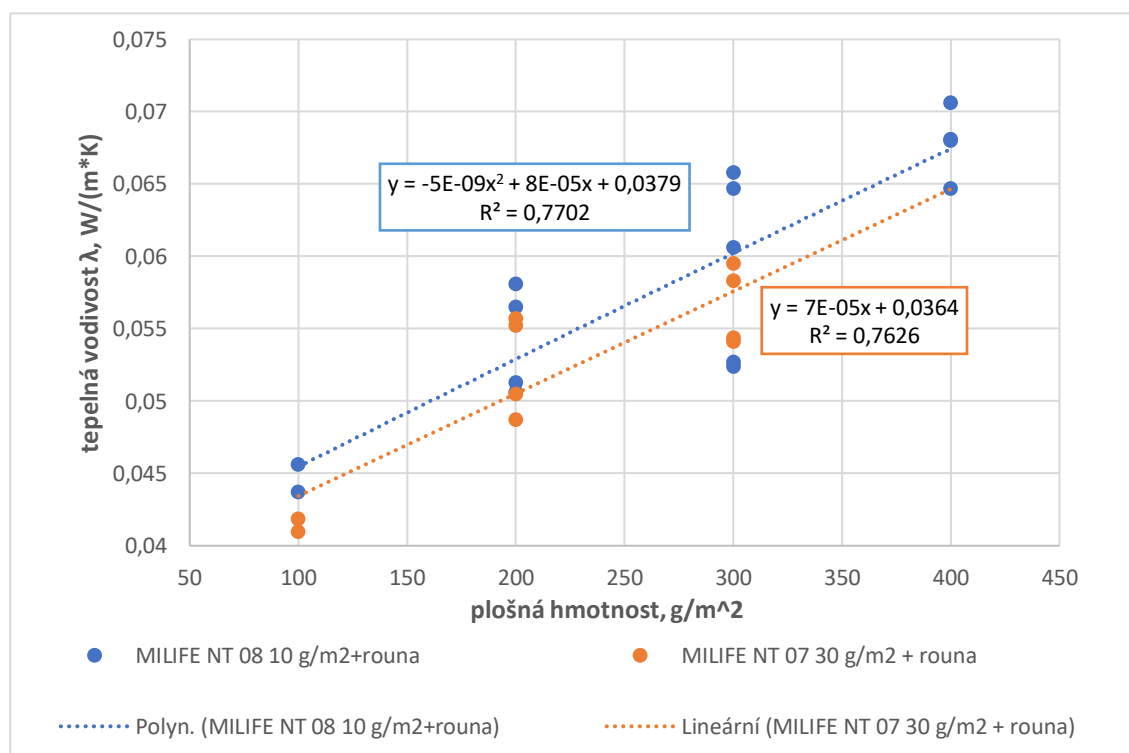
Tab.7 Výsledky měření pro kombinace NT 07 a roun

Kombinace vrstev	Měrná tepelná vodivost λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	SM IS λ	HM IS λ	Plošný odpor vedení tepla R_t [W^{-1}Km^2]	SM IS R_t	HM IS R_t	Izolace I_c [clo]
Směr tepelného toku: od MILIFE k rounu							
NT07+FT100	0,0410	0,0404	0,0416	0,125	0,121	0,130	0,81
NT07+2xFT100	0,0487	0,0481	0,0493	0,223	0,216	0,229	1,44
NT07+3xFT100	0,0541	0,0538	0,0544	0,232	0,228	0,236	1,50
NT07+FT200	0,0557	0,0551	0,0563	0,225	0,219	0,231	1,45
NT07+FT300	0,0595	0,0590	0,0600	0,328	0,324	0,332	2,12
Směr tepelného toku: od rouna k MILIFE							
FT100 +NT07	0,0419	0,0415	0,0423	0,125	0,121	0,129	0,81
2xFT100+NT07	0,0505	0,0498	0,0512	0,213	0,210	0,216	1,37
3xFT100+NT07	0,0544	0,0541	0,0547	0,304	0,299	0,310	1,96
FT200+NT07	0,0552	0,0549	0,0555	0,250	0,247	0,253	1,61
FT300+NT07	0,0583	0,0579	0,0587	0,334	0,329	0,339	2,16

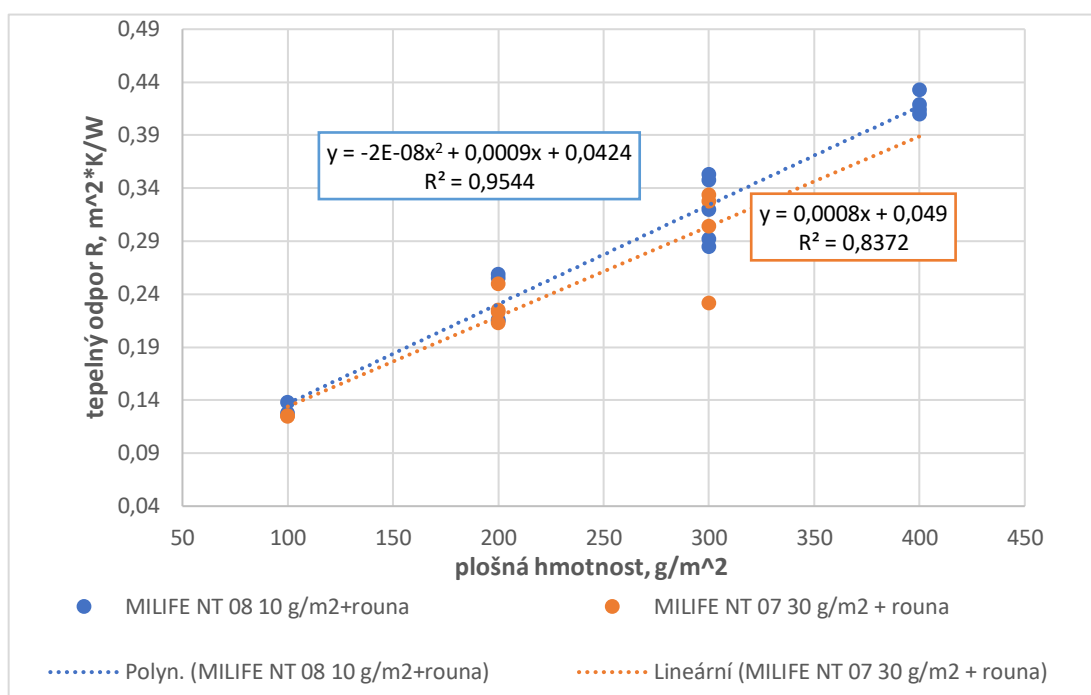


Tab.8 Výpočet celkové izolace sendvičů

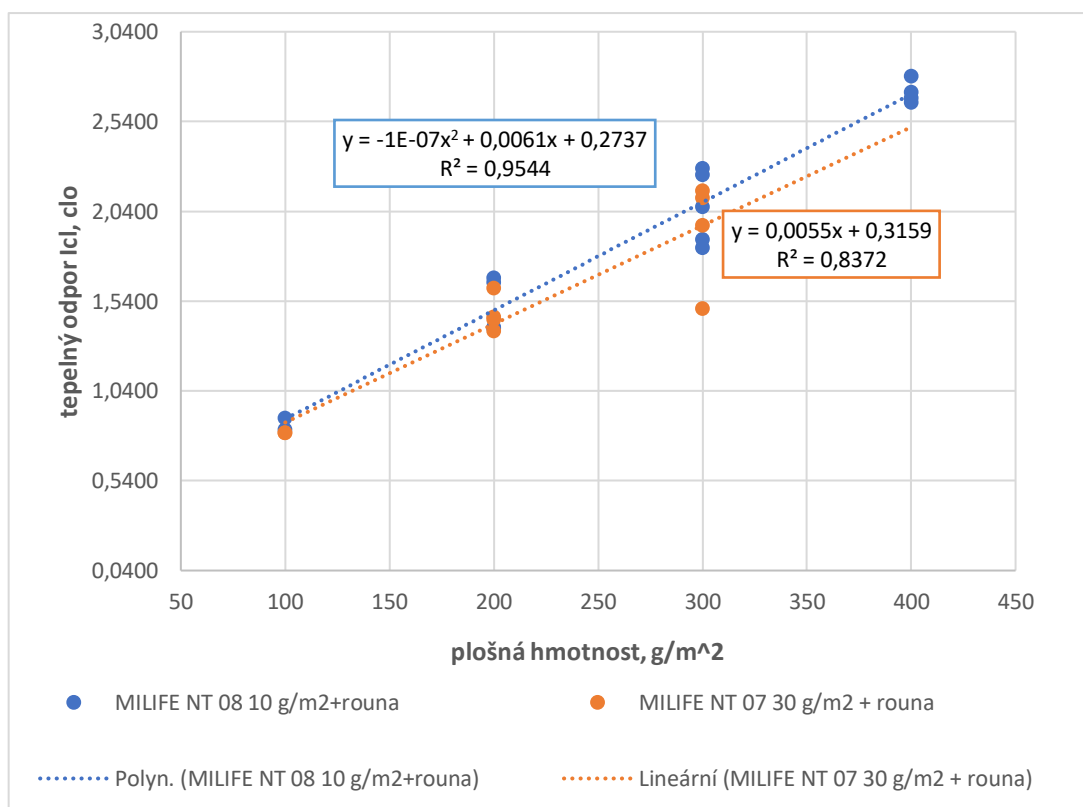
Název sendviče	Izolace I_c [clo]	Název sendviče	Izolace I_c [clo]
8B 100	1,21	8A 100	1,15
8B 2*100	1,71	8A 2*100	1,71
8B 3*100	2,15	8A 3*100	2,20
8B 2*150	2,56	8A 2*150	2,60
8B 200	1,99	8A 200	1,97
8B 2*200	2,97	8A 2*200	2,99
8B 300	-	8A 300	2,39
8B 400	3,11	8A 400	3,02
7B 100	1,13	7A 100	1,13
7B 2*100	1,76	7A 2*100	1,69
7B 3*100	1,82	7A 3*100	2,28
7B 200	1,77	7A 200	1,93
7B 300	2,44	7A 300	2,48



Obr. 21 Závislost tepelné vodivosti termoizolačních vrstev na plošné hmotnosti rouna



Obr. 22 Závislost tepelného odporu termoizolačních vrstev na plošné hmotnosti rouna



Obr. 23 Závislost clo termoizolačních vrstev na plošné hmotnosti rouna



DISKUSE

Z grafů je zřejmé, že u všech zkoumaných vrstev a sendvičů se zvětšením plošné hmotnosti rostou hodnoty tepelné vodivosti a tepelného odporu. Důležitou roli ve zvětšení tepelného odporu sendvičů hrají vzduchové mezery mezi vrstvami. Během dalších úprav sendviče, zejména laminování, dojde ke změně tloušťky vrstev a vzduchových mezer mezi nimi, což přivede k změně tepelné vodivosti a tepelného odporu sendvičů.

Nejvyšší hodnoty λ mají sendviče s nejsilnějším roumem 8B 400 s $I_c = 3,11$ a 8A 400 s $I_c = 3,02$. Celkově soustavy s MILIFE NT 08 mají vyšší hodnoty tepelného odporu. Nelze jednoznačně určit optimální polohu rouna, proto tento cíl bude řešen i v dalších experimentech.

Nepřesnost výsledků měření mohla být způsobena absencí klimatizační komory, která je vyžadovaná pro přípravu vzorků podle normy ČSN EN 20139 [31].



3.1.4 Měření reflektance, transmitance a výpočet absorbance

V rámci zkoumání izolace radiační složky tepla bylo provedeno měření reflektance a transmitance s následným výpočtem absorbance. Cílem bylo stanovit míru odrazivosti elektromagnetického vlnění odpovídajícího tepelnému vyzařování v oblasti vlnových délek 2 až 20 μm povrchem měřeného vzorku materiálu.

Byla měřena reflektance jednotlivých složek sendvičů a vybraných sendvičů typu 8A a 8B, ve kterých byla použita textilie MILIFE o plošné hmotnosti 10 gm^{-2} a rouna různých plošných hmotností. Předpokládá se, že u sendviče typu B většina elektromagnetického vlnění prochází podšívkou, část se odrazí u pokovené vrstvy MILIFE, zbytek prochází k rounu, částečně se absorbuje, částečně se odrazí a prostupuje k svrchní vrstvě. U sendviče typu A se vlnění nejprve absorbuje a odráží od rouna, pak prostupuje k vrstvě MILIFE.

Reflektance byla měřena jako funkce vlnové délky.

Hodnoty reflektance získané z přístroje byly přepočteny dle Planckova zákona s použitím teploty 30°C. Byla také vypočtena sumární reflektance. Na základě měření pěti vzorků byl určen výběrový průměr a 95% interval spolehlivosti střední hodnoty sumární reflektance. Výsledky jsou uvedeny v tab.9-11 a na obr.24-20.

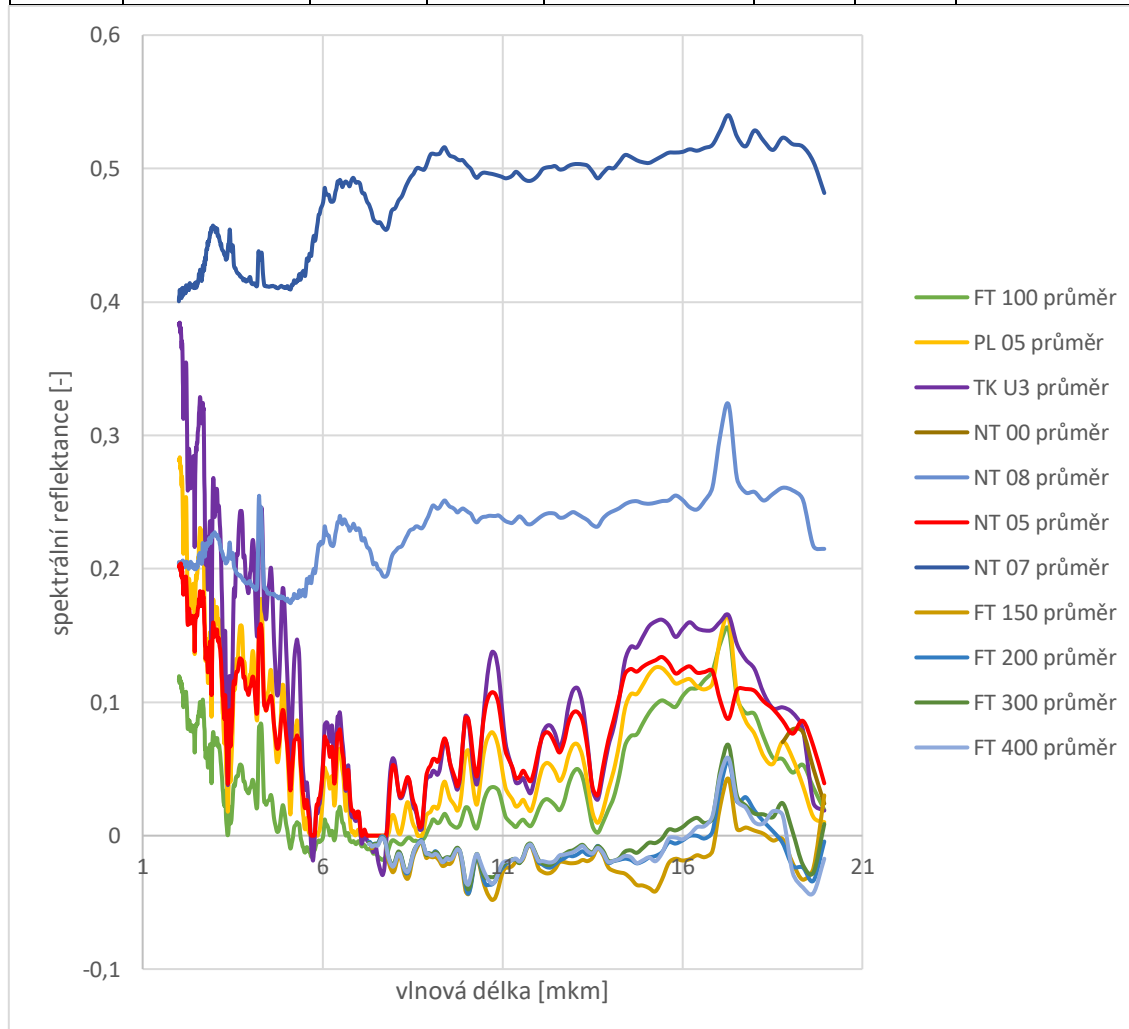
A) Jednotlivé vrstvy

Tab.9 Výsledky měření jednotlivých vrstev

Název vrstvy	Reflektance odrazivost ρ [-]	SM IS	HM IS	Transmitance propustnost τ [-]	SM IS	HM IS	Absorbance pohltivost α [-]
NT 00	0,0512	0,0468	0,0555	0,359	0,336	0,382	0,590
NT 05	0,0755	0,0681	0,0829	0,168	0,112	0,223	0,757
NT 07	0,4994	0,4739	0,5249	0,310	0,163	0,456	0,191
NT 08	0,2447	0,1850	0,3044	0,441	0,191	0,692	0,314
PL 05	0,0583	0,0558	0,0609	0,281	0,093	0,470	0,661



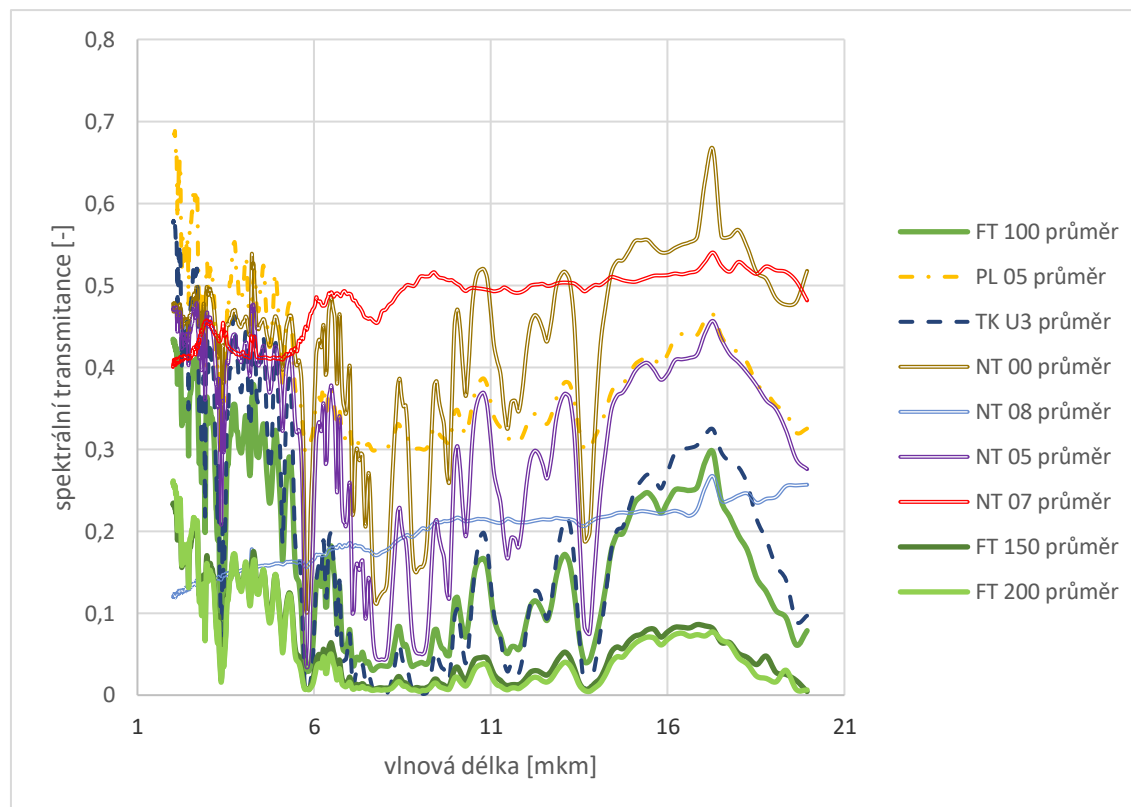
TK U3 A	0,0881	0,0872	0,0889	0,334	0,180	0,487	0,578
TK U3 B	0,0882	0,0867	0,0897	0,193	0,139	0,248	0,719
FT 100	0,0363	0,0279	0,0447	0,119	0,105	0,132	0,845
FT 150	0,0369	0,0326	0,0413	0,040	0,029	0,051	0,923
FT 200	0,0444	0,0413	0,0476	0,034	0,027	0,027	0,922
FT 300	0,0477	0,0439	0,0515	-			-
FT 400	0,0441	0,0423	0,0460	-			-



Obr.24 Závislost refleksance jednotlivých vrstev na vlnové délce

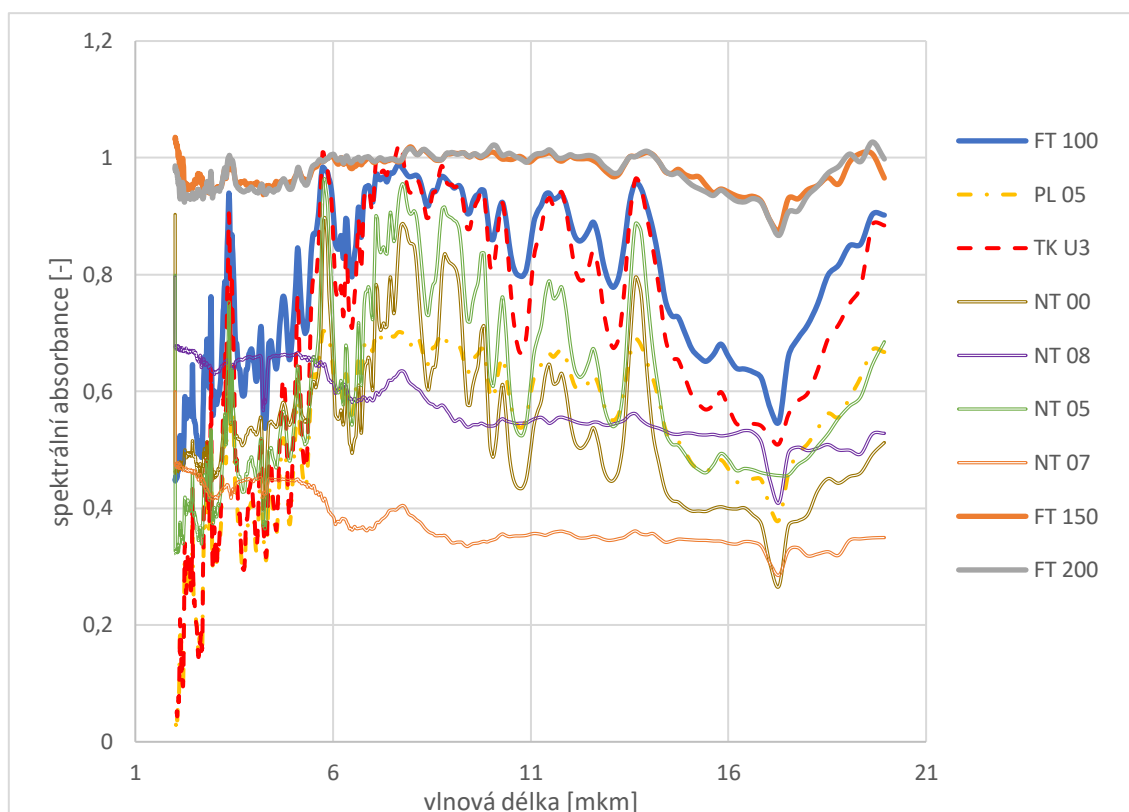


Z grafu (viz obr.24) je zřejmé, že nejvyšší hodnoty reflektance vykazují pokovené vrstvy MILIFE NT 08 (10 g/m²) a NT 07 (30 g/m²), přičemž NT 07 má dvakrát větší hodnotu ve srovnání s NT 08. Podšívka, svrchní vrstva a nepokovené MILIFE jsou na přibližně stejné úrovni. Nejmenší odrazivost mají rouna.



Obr. 25 Závislost transmittance jednotlivých vrstev na vlnové délce

Z grafu (viz obr.25) je vidět, že rouna mají nejnížší úroveň propustnosti elektromagnetického vlnění. Rouna s větší tloušťkou FT 300 a FT 400 nešlo zkoumat kvůli technickým omezením zařízení.



Obr.26 Závislost absorbance jednotlivých vrstev na vlnové délce

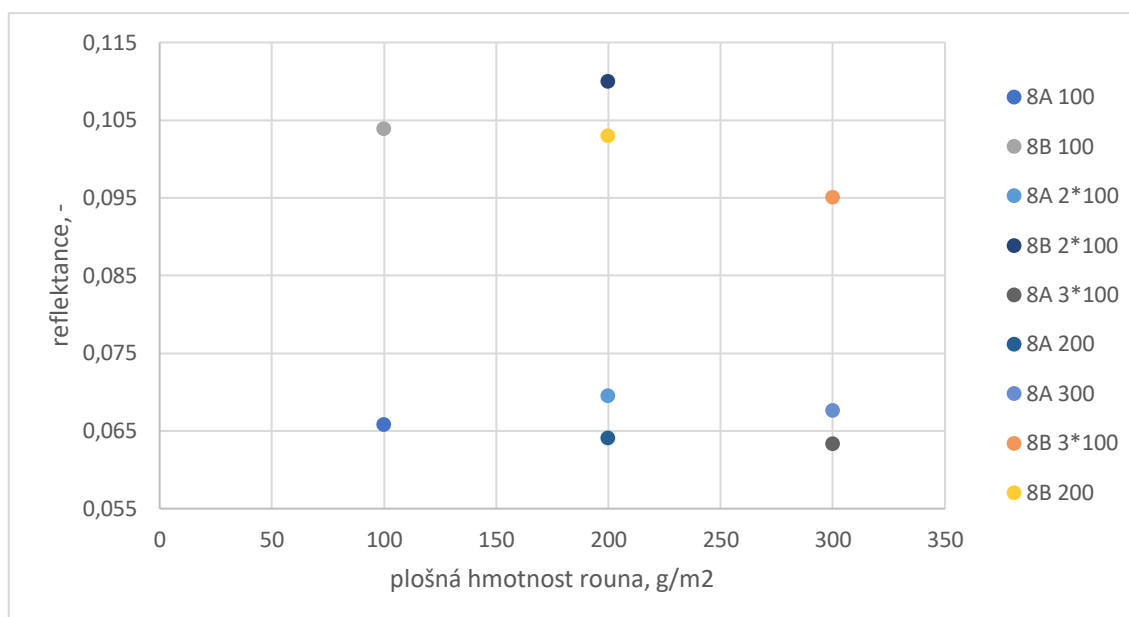
Jak už vyplývá z výsledků reflektance a transmittance, rouna vykazují největší hodnoty absorbance, vzrůstající s plošnou hmotností (viz obr.26). Svrchní vrstva a podšívka jsou na střední úrovni, a MILIFE mají nejnižší hodnoty pohltivosti.

B) Sendviče

Výsledky měření jsou uvedené v tab.10. a na obr. 27.

Tab. 10 Výsledky měření reflektance sendvičů

Název sendviče	Reflektance ρ [-]	Spodní mez IS	Horní mez IS
8A 100	0,066	0,065	0,067
8B 100	0,104	0,098	0,109
8A 2*100	0,070	0,068	0,071
8B 2*100	0,110	0,106	0,114
8A 3*100	0,063	0,063	0,064
8A 200	0,064	0,063	0,065
8A 300	0,068	0,068	0,068
8B 3*100	0,095	0,091	0,099
8B 200	0,103	0,098	0,109



Obr. 27 Závislost reflektance sendvičů 1. skupiny na plošné hmotnosti rouna

Z grafu (viz obr.27) je vidět markantní rozdíl mezi sendviči typu A a B. Typ B vykazuje o cca. 50% větší reflektance kvůli poloze vrstvy MILIFE.

DISKUSE

Z výsledků je patrné, že nejvyšší odrazivost mají pokovené vrstvy MILIFE: $\rho=0,499$ u NT 07 a $\rho=0,245$ u NT 08. Mezi rouny lze vyjmenovat FT 200 s $\rho=0,044$ a FT 300 s $\rho=0,048$. Celkově ale rouna vykazují nejnižší reflektanci a nejvyšší absorbanci.

Z výsledků vyplývá, že MILIFE je účinnější v pozici mezi podšívkou a rounem, což znamená, že výkonnější je odraz elektromagnetického vlnění hned po průchodu podšívkou. Sendviče typu B prokazují největší hodnoty odrazivosti: 8B 2*100 s $\rho=0,110$; 8B 100 s $\rho=0,104$; 8B 200 s $\rho=0,103$; 8B 3*100 s $\rho=0,095$.



3.1.5 Měření emisivity vrstev MILIFE pomocí termokamery FLIR

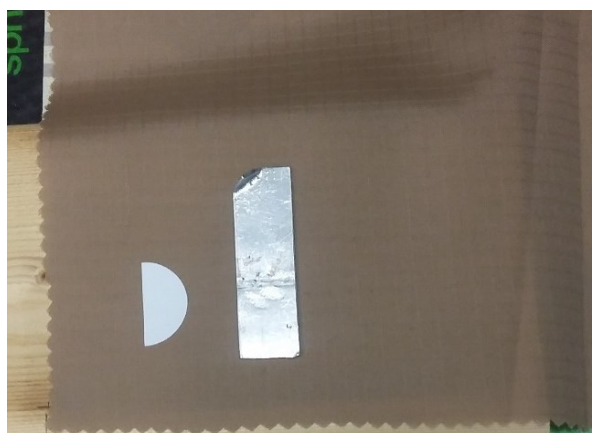
S cílem optimalizace měření izolace radiační složky tepla bylo provedeno měření emisivity laboratorních vzorků MILIFE.

Termokamera umožňuje provádět infračervené snímky sledovaného objektu i kvantifikovat, tedy určit teplotu na povrchu měřeného objektu. Na povrchu měřeného vzorku je nálepka s určenou emisivitou $\epsilon=0,96$. Povrch nálepky a samotného vzorku je ohříván pomocí kovové destičky, zdroj tepla – žehlička. Předpokládá se, že povrch vzorku a nálepky po 20 vteřinách mají stejnou teplotu, na základě které se pak dopočítává emisivita materiálu v softwaru FLIR ResearchIR Max (viz obr. 27-30).

Vzdálenost mezi kamerou a objektem pro případ vzduchu nemá obvykle příliš velkou váhu ve srovnání s ostatními parametry ovlivňujícími přesnost určení teploty povrchu objektu. Výsledky měření jsou uvedené v tab.11-12 a na obr.31-32.



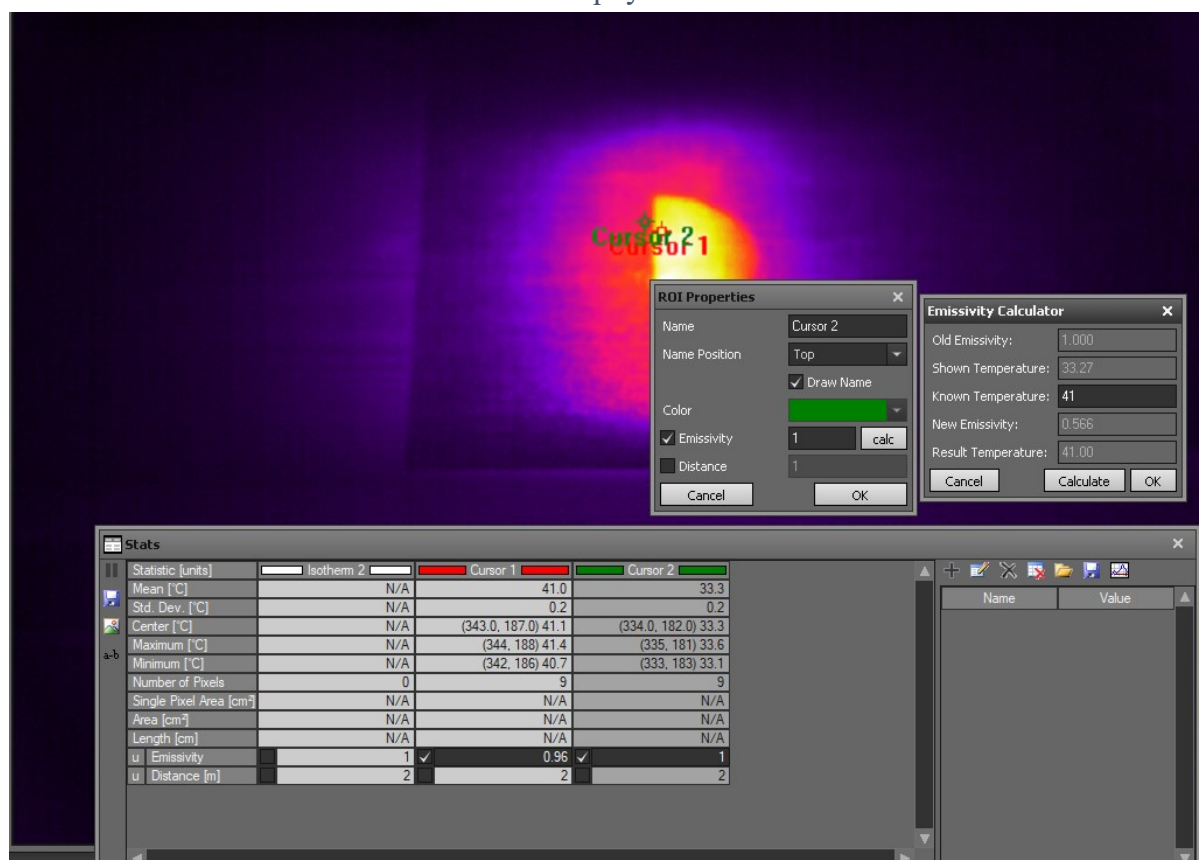
Obrázek 27 Ukázka experimentu



Obrázek 28 Připravený vzorek: nálepka s emisivitou $\epsilon=0,96$ a kovová destička pro ohřívání



Obrázek 293 Nálepky s určenou emisivitou



Obrázek 30 4Výpočet emisivity v softwaru FLIR ResearchIR Max

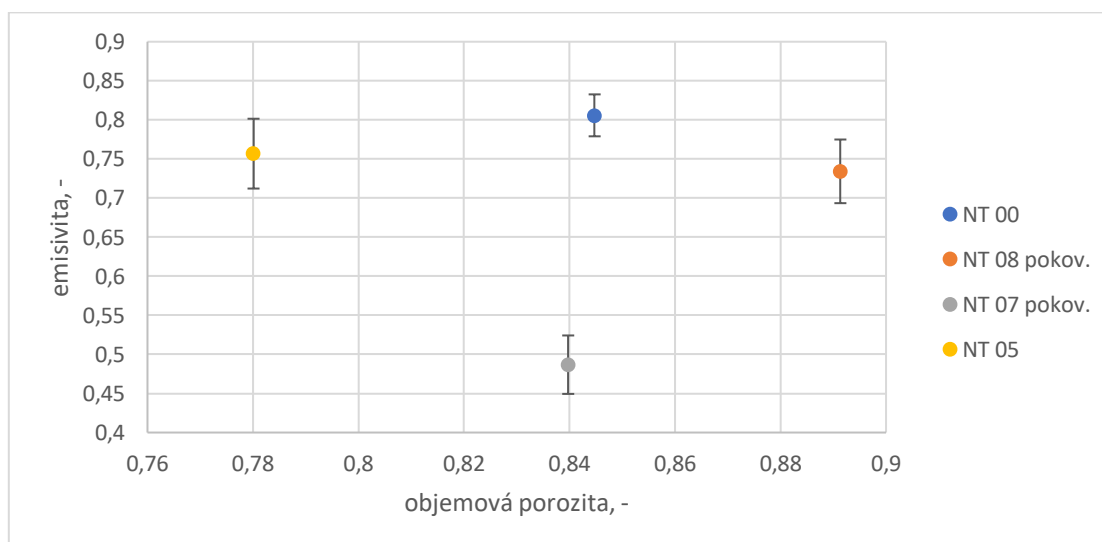


Tabulka 11 Výslední hodnoty emisivity

Název vzorku	Emisivita ε [-]	Spodní mez IS	Horní mez IS
NT 00 rezná, 10 g/m ²	0,8058	0,77898	0,83262
NT 08 pokov., 10 g/m ²	0,7342	0,69344	0,77489
NT 05 rezná, 30 g/m ²	0,7568	0,71214	0,80146
NT 07 pokov., 30 g/m ²	0,4868	0,44941	0,52419

Hodnoty emisivity, určené podle tabulek [33-35], pohybují se v rozmezí $\varepsilon=0,75-0,85$ u polyesteru, $\varepsilon=0,4-0,8$ u mědi a $\varepsilon=0,2-0,5$ u niklu. Uvedená data jsou pouze orientační, protože emisivita hodně závisí na teplotě a charakteru povrchu.

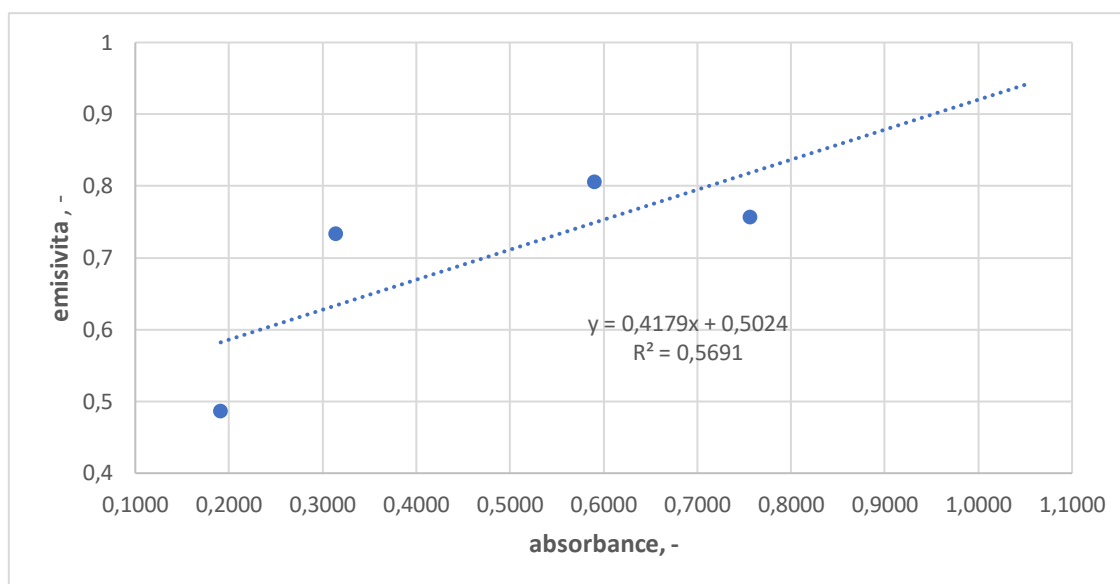
Každopádně, pozorujeme pokles emisivity u pokovených vrstev MILIFE: $\varepsilon=0,734$ u NT 08 a $\varepsilon=0,487$ u NT 07. Na grafech níže (viz obr.31) pozorujeme závislost emisivity na objemové porozitě. Nelze určit podstatný korelační vztah.



Obrázek 315 Vliv objemové porozity na emisivitu MILIFE

Tabulka 12 Průměrné hodnoty absorpance a emisivity

Název vzorku	Absorbance α [-]	Emisivita ε [-]
NT 00 rezná, 10 g/m ²	0,5903	0,8058
NT 08 pokov., 10 g/m ²	0,3139	0,7342
NT 05 rezná, 30 g/m ²	0,7568	0,7568
NT 07 pokov., 30 g/m ²	0,1911	0,4868



Obrázek 32 Sledování závislostí mezi emisivitou a absorbancí

V případě absolutně černého tělesa, podle Kirchhoffova zákona o vyzařování, poměr emisivity (intenzity vyzařování) a absorbance (pohltivosti) je funkcí pouze jedné proměnné – teploty (viz rovnice 14, kapitola 1.3.3).

V případě šedých těles, korelace hodnot absorbance a emisivity je celkem silná. Jak je patrné z grafu (viz obr.32), nelze určit korelační vztah mezi emisivitou a absorbancí. Pokovení NT 08 způsobuje pokles emisivity na 10 % v porovnání s nepokovenou NT 00 ($m_s=10 \text{ g/m}^2$), když pokovení NT 07 způsobuje pokles emisivity na 35 % oproti nepokovené NT 05 ($m_s=30 \text{ g/m}^2$).

DISKUSE

Z výsledků je patrné, že změna emisivity vrstev MILIFE je způsobena pokovením a nekoreluje s vnitřní strukturou.

Prováděné měření bylo zatíženo velkou porozitou a nestejnou měrností povrchu vrstev MILIFE. Navíc nepřesnost měření mohla být způsobena tepelnými toky v místnosti, kvůli nimž docházelo k rychlé změně povrchové teploty vzorku. Měření emisivity je důležité při měření radiční složky záření, hlavně když se snímá teplota povrchu. Ideálně by mělo být prováděné současně se snímáním teploty za úplně stejných podmínek. Nicméně, při měření sendvičů emisivita MILIFE nehraje výraznou roli, protože MILIFE se nachází uvnitř sendviče.



3.1.6 Měření stupně tepelné izolace záření Ir

Podle metodiky uvedené v kapitole 2 byly měřeny jednotlivé vzorky a sendviče typů A a B. Měření probíhalo s nastavením hodnoty emisivity $\varepsilon=0,96$ pro běžné materiály. Teplota vzduchu v laboratoři byla $t=21,5-22,5$ °C, vlhkost vzduchu $\varphi=38-40$ %. Každé měření bylo prováděno minimálně pětkrát. Byly vypočteny průměrné hodnoty stupně izolace Ir a 95% intervaly spolehlivosti středních hodnot.

A) Jednotlivé vrstvy

S ohledem na pokovení vrstev MILIFE, byl proveden přepočítaný povrchové teploty všech MILIFE podle hodnot emisivity, získaných v kapitole 3.1.5. Vztah pro přepočítaný je uveden v kapitole 1.3.3 (viz rov.13). Výsledky jsou uvedené na obr. 33-34 a v tab.13.

Tabulka 13 Výsledky měření stupně izolace Ir jednotlivých vrstev

Typ materiálu	Stupeň izolace Ir, -	Spodní mez IS, -	Horní mez IS, -	Třída
TK U3	0,32	0,31	0,33	3
NT 00 režná, 10 g/m ²	0,04	0,03	0,05	4
NT 08 pokov., 10 g/m ²	0,23	0,17	0,28	3
NT 05 režná, 30 g/m ²	0,09	0,04	0,15	4
NT 07, pokov. 30 g/m ²	0,32	0,25	0,40	2
FT 100	0,32	0,31	0,33	3
FT 150	0,48	0,45	0,56	3
FT 200	0,52	0,49	0,56	2
FT 300	0,64	0,57	0,70	2
FT 400	0,72	0,64	0,81	1
PL 05	0,16	0,15	0,18	4

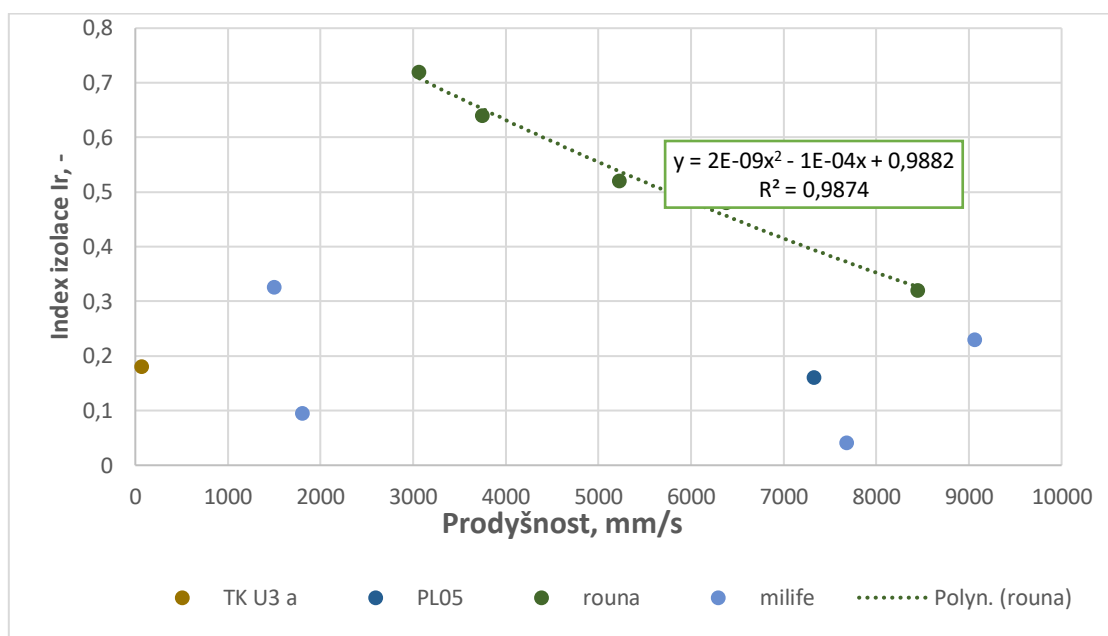
Výsledky byly následně zpracovány statisticky a rozděleny do čtyř tříd: 1. třída – 0,7-0,9, 2. třída – 0,5-0,7, 3. třída – 0,3-0,5, 4. třída – 0-0,3. V mezích prováděného experimentu 1. třída odpovídá nejlepším výsledkům.

Z výsledků vyplývá, že nejvyšší hodnoty tepelné izolace mají rouna FT 400, 300 a 200. MILIFE NT 07 pokovené 30 g/m² je na úrovni s FT 200 a svrchní vrstvou TK U3. Rozdíl mezi indexem izolace roun FT 300 a FT 400 je statisticky nevýznamný. Takže v případě, že potřebujeme co nejmenší tloušťku termoizolační vrstvy, je optimální použít rouno s menší plošnou hmotností, tj. FT 300.

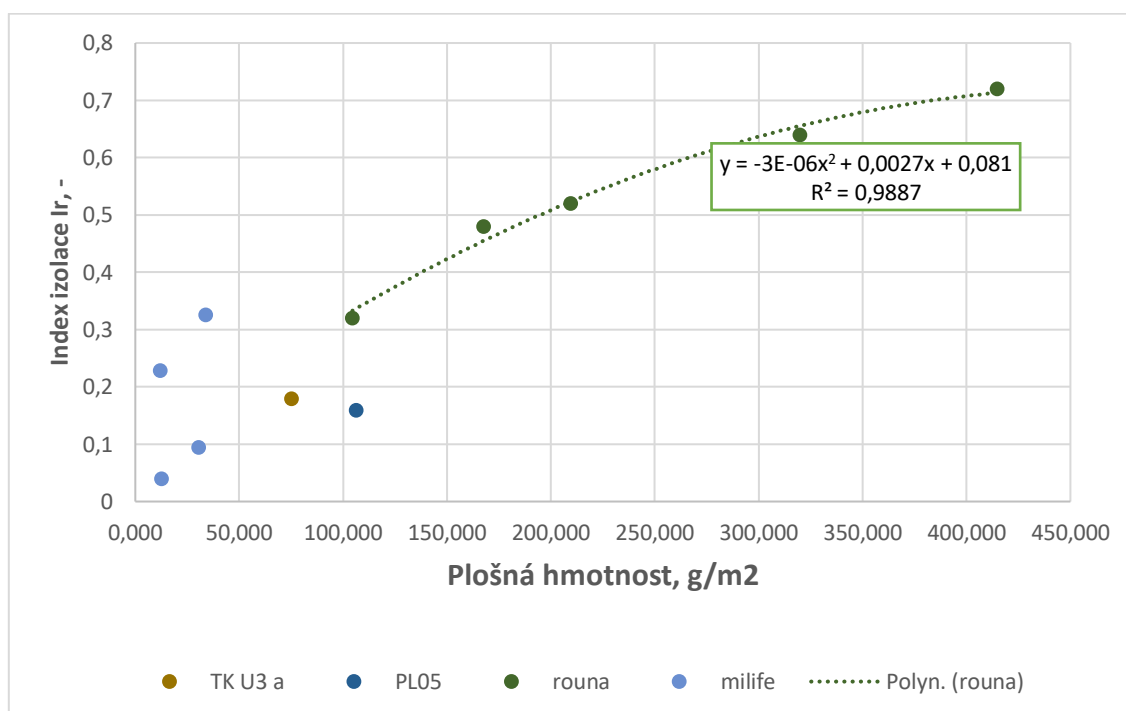
Je také patrné, že jedná vrstva netkané pokovené textilie MILIFE s plošnou hmotností 30 g/m² může nahradit rouno FT 100 s plošnou hmotností 100 g/m² s cílem ztenčit výslednou



tloušťku celého sendviče. Nadto MILIFE NT 07 se může používat v kombinaci s rounem FT 400, 300 nebo 200, v závislosti na požadované tloušťce. Z grafů (viz obr.33-34) je patrné, že index izolace klesá se zvětšením prodyšnosti roun, u MILIFE je obtížné určit charakter závislosti. S rostoucí plošnou hmotností roste index izolace roun, u MILIFE zvětšení hodnoty indexu izolace je způsobeno spíše pokovením.



Obr. 33 Závislost stupně tepelné izolace jednotlivých vrstev na prodyšnosti



Obr.34 Závislost stupně tepelné izolace jednotlivých složek na plošné hmotnosti

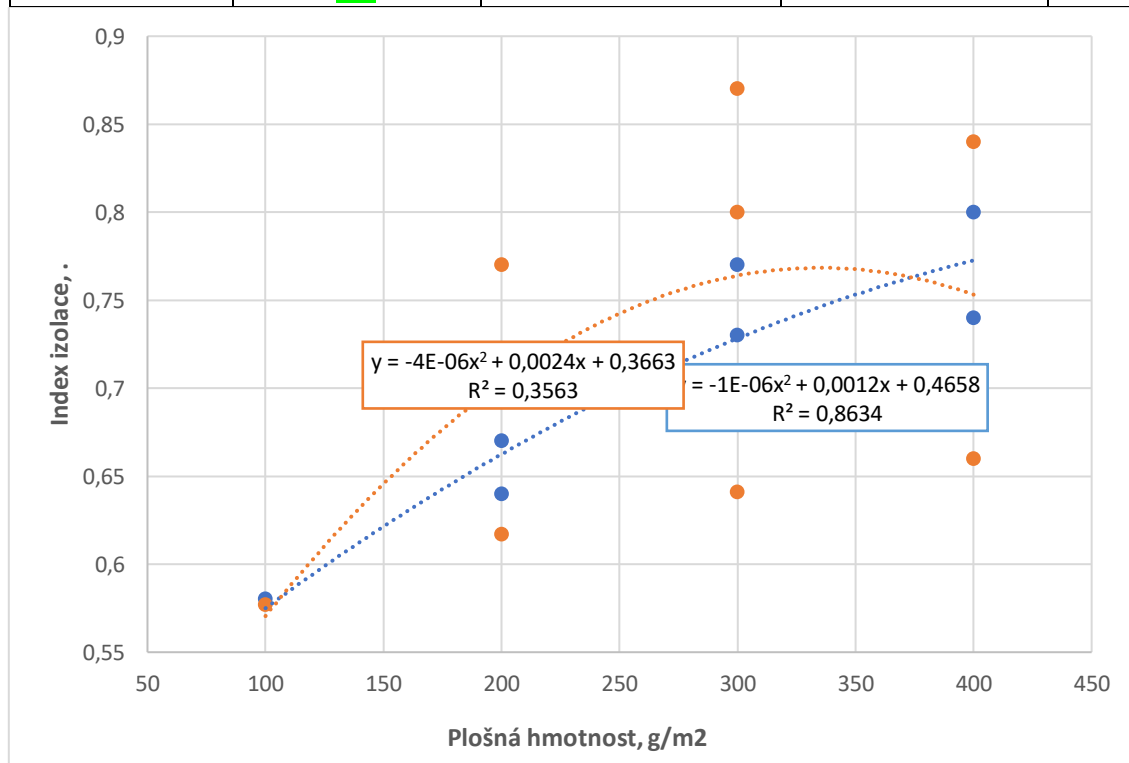


A) Sendviče

Výsledky měření jsou uvedené v tab.14-15 a na obr. 35-37 a seřazeny do tříd: 1. třída – 0,8-0,9, 2. třída – 0,7-0,8, 3. třída – 0,6-0,7, 4. třída – 0,5-0,6.

Tabulka 14 Index izolace sendvičů s MILIFE NT 07

Název sendviče	Index izolace Ir, -	Spodní mez 95% IS, -	Horní mez 95% IS,	Třída
7A 100	0,58	0,53	0,63	4
7 A 2*100	0,64	0,62	0,66	3
7 A 3*100	0,70	0,69	0,71	2
7 A 400	0,74	0,73	0,75	2
7 A 2*150	0,73	0,72	0,75	2
7 A 200	0,67	0,64	0,69	3
7 A 2*200	0,80	0,79	0,82	1
7 A 300	0,77	0,73	0,80	2
7B 100	0,58	0,55	0,60	4
7 B 2*100	0,62	0,59	0,64	3
7 B 3*100	0,64	0,62	0,66	3
7 B 400	0,66	0,64	0,68	3
7 B 2*150	0,87	0,85	0,88	1
7 B 200	0,77	0,76	0,78	2
7 B 2*200	0,84	0,82	0,86	1
7 B 300	0,8	0,77	0,83	1



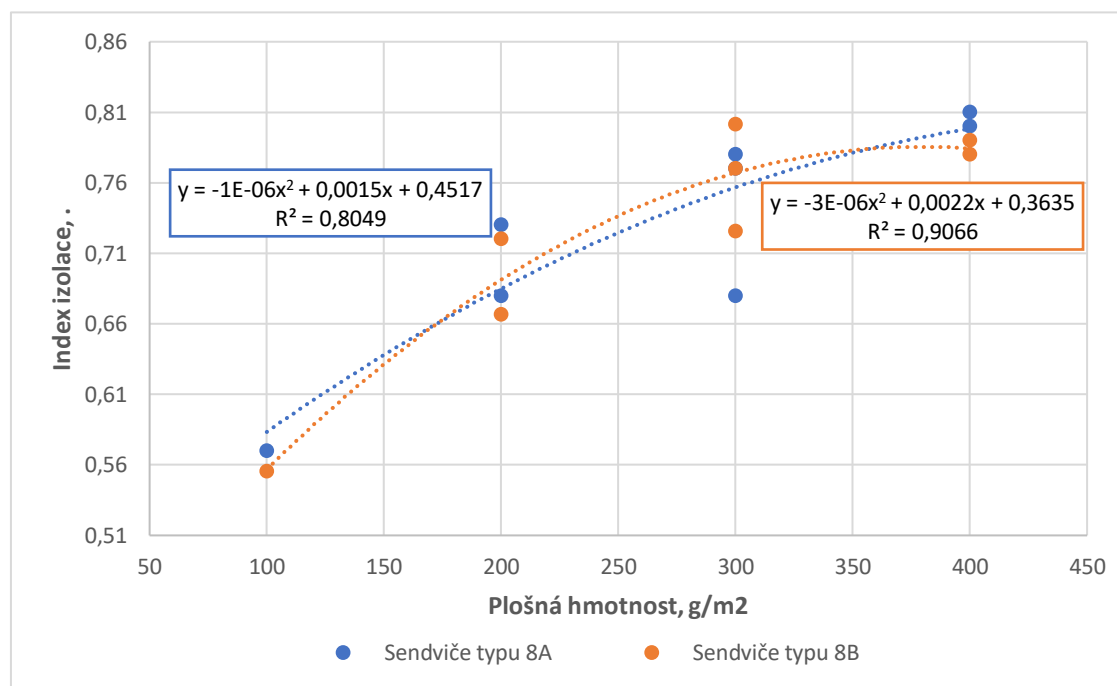
Obrázek 35 Závislost indexu izolace sendvičů s MILIFE NT 07, 30 g/m2, na plošné hmotnosti rouna



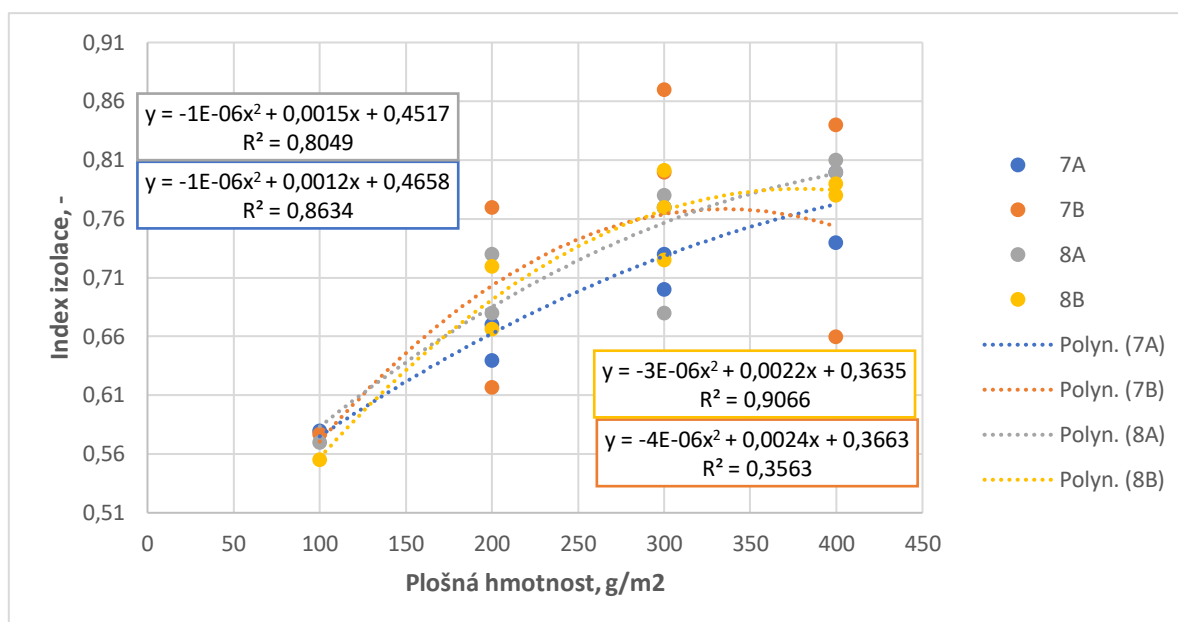
Jak je znázorněno na grafech (viz obr.35-37), stupeň izolace roste se zvýšením plošné hmotnosti rouna nebo kombinace roun. Z výsledků vyplývá, že největší hodnotu indexu izolace $I_r = 0,87$ má sendvič 7B 2*150. Vysoké hodnoty, které též spadají do 1.třídy, prokazují soupravy 7 B 2*200 ($I_r = 0,84$), 7 B 300 ($I_r = 0,8$) a 7 A 2*200 ($I_r = 0,8$). V podstatě, jsou to kombinace roun s celkovou plošnou hmotností 300 nebo 400 g/m².

Tabulka 15 Index izolace sendvičů s MILIFE NT 08

Typ textilie	Index izolace I_r , -	Spodní mez 95% IS, -	Horní mez 95% IS, -	Třída
8A 100	0,57	0,54	0,6	4
8 A 2*100	0,68	0,65	0,7	3
8 A 3*100	0,68	0,66	0,70	3
8 A 400	0,80	0,79	0,81	1
8 A 2*150	0,77	0,75	0,79	2
8 A 200	0,73	0,7	0,75	2
8 A 2*200	0,81	0,79	0,84	1
8 A 300	0,78	0,76	0,79	2
8B 100	0,56	0,53	0,58	4
8 B 2*100	0,67	0,62	0,71	3
8 B 3*100	0,73	0,70	0,75	2
8 B 400	0,78	0,76	0,8	2
8 B 2*150	0,77	0,76	0,78	2
8 B 200	0,72	0,70	0,73	2
8 B 2*200	0,79	0,77	0,8	2
8 B 300	0,80	0,78	0,83	1



Obrázek 36 Závislost I_r sendvičů s MILIFE NT 08 na plošné hmotnosti rouna



Obrázek 37 Závislost indexu izolace všech typů sendvičů na plošné hmotnosti rouna

DISKUSE

Porovnání výsledků indexu izolace jednotlivých vrstev a dvou skupin sendvičů ukázalo, že největší index izolace $I_r=0,57$ prokazuje MILIFE NT 07 s $m_s=30 \text{ g/m}^2$. MILIFE je účinnější v kombinaci s rounem FT 300 nebo 2*150, když MILIFE je mezi podšívkou a rounem (typ 7B a 8B; $I_{r\max}=0,87$ u sendviče 7B 2*150), anebo MILIFE je účinnější v kombinaci s rounem FT 400 nebo 2*200, když MILIFE je mezi rounem a vrchovou vrstvou (typ 7A a 8A; $I_{r\max}=0,81$ u sendviče 8A 2*200). S ohledem na cíl práce, jako optimální jsou hodnoceny sendviče 7B 2*150 a 8B 300.



DÍLČÍ ZÁVĚR 1. SKUPINA

Měření laboratorních vzorků a sendvičů bylo zaměřeno na zkoumání optimálního složení sendviče a pořadí termoizolačních vrstev. Z hlediska fyzikálních vlastností, je nutné zaznamenat, že jak rouna, tak i vrstvy MILIFE mají nerovnoměrnou strukturu, což při většině měření způsobuje vysokou variabilitu dat.

Měření prodyšnosti prokázalo, že změna pořadí MILIFE a rouna uvnitř soupravy nevede ke statisticky významnému rozdílu ve výsledných hodnotách. Prodyšnost vzduchu sendviče je hlavním způsobem ovlivněna podšívkou ($R=7328 \text{ mm/s}$) a vrchovou vrstvou ($R=71,3 \text{ mm/s}$).

Z hlediska tepelných vlastností, nejlepší výsledek mají sendviče 8B 400 s $I_c = 3,11$ a 8A 400 s $I_c = 3,02$. Právě zvětšení plošné hmotnosti rouna prospívá izolaci kondukční složky přestupu tepla sendvičem. Pořadí MILIFE a rouna nemají významný vliv.

Při zkoumání radiační složky přestupu tepla byl měřen index izolace jednotlivých vrstev a dvou skupin sendvičů. S ohledem na cíl práce, jako optimální jsou hodnoceny sendviče 7B 2*150 a 8B 300.

Měření reflektance prokázalo, že největší odrazivost mají sendviče typu B, tj. MILIFE je účinnější v pozici mezi podšívkou a rounem. Nejvyšší hodnoty reflektance sledujeme u sendvičů 8B 2*100 s $\rho=0,110$ a 8B 100 s $\rho=0,104$.



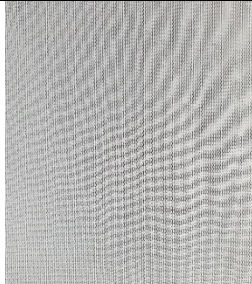
Optimální souprava se skládá z podšívky, vrstvy MILIFE NT 08 s $m_s=10 \text{ g/m}^2$, rounem FT 200 a vrchovou vrstvou TK U3. Při snaze zvýšit celkový tepelný odpor soupravy, je doporučeno použít MILIFE NT 07 s $m_s=30 \text{ g/m}^2$ a rouno o vyšší plošné hmotnosti FT 300.



3.2 Měření vlastností vzorků 2. skupiny

Ve skupině č.2 jsou prezentované komerční vzorky MILIFE a podšívka z druhé šarže, vyvinuté na základě výsledků laboratorních vzorků z 1. skupiny. Rouna a svrchní vrstva zůstávají stejné, jako v 1. skupině (viz tab.1). Komerční vzorky jsou uvedené v tab.16.

Tab. 16 Popis experimentálních vzorků 2. skupiny

Obrázek	Název	Struktura	Funkce	Plošná hmotnost nominální m_{s0} , g/m ²
	SPETEX NT 05/02	MILIFE akt. 5:1 Cu:Ni, pokovená 98 % Cu/ 2 % Ni – bez ochrany	Prostřední – termoizolační – vrstva	30
	SPETEX NT 05/02/3	MILIFE akt. 5:1 Cu:Ni, pokovená 98 % Cu/ 2 % Ni – s ochranou		30
	SPETEX NT 07	PES pletenina, filet	Podšívka	67



3.2.1 Měření plošné hmotnosti, tloušťky a výpočet objemové porozity jednotlivých vrstev

Výsledky měření a výpočtů jsou uvedené v tab.17.

Tab. 17 Parametry jednotlivých vrstev

Název materiálu	Struktura a složení	Tloušťka h , mm	Plošná hmotnost nominální m_{s0} , g/m ²	plošná hmotnost vypočtená m_s , g/m ²	Hustota textilie ρ_t , kg/m ³	Objemový podíl μ , -	Objemová porozita P_o , -
SPETEX NT 05/02 bez ochrany	MILIFE pokovená: 8% Ni/ 92 %Cu	0,1029	30	38,520	374,344	0,275	0,725
SPETEX NT 05/02/3 s ochranou	MILIFE pokovená: 8% Ni/ 92 %Cu	0,102	30	35,600	349,020	0,257	0,743
SPETEX PL 07	PES pletenina, fileť	0,2435	67	68,160	279,918	0,206	0,794

3.2.2 Měření prodyšnosti vzduchu jednotlivých vrstev a sendvičů

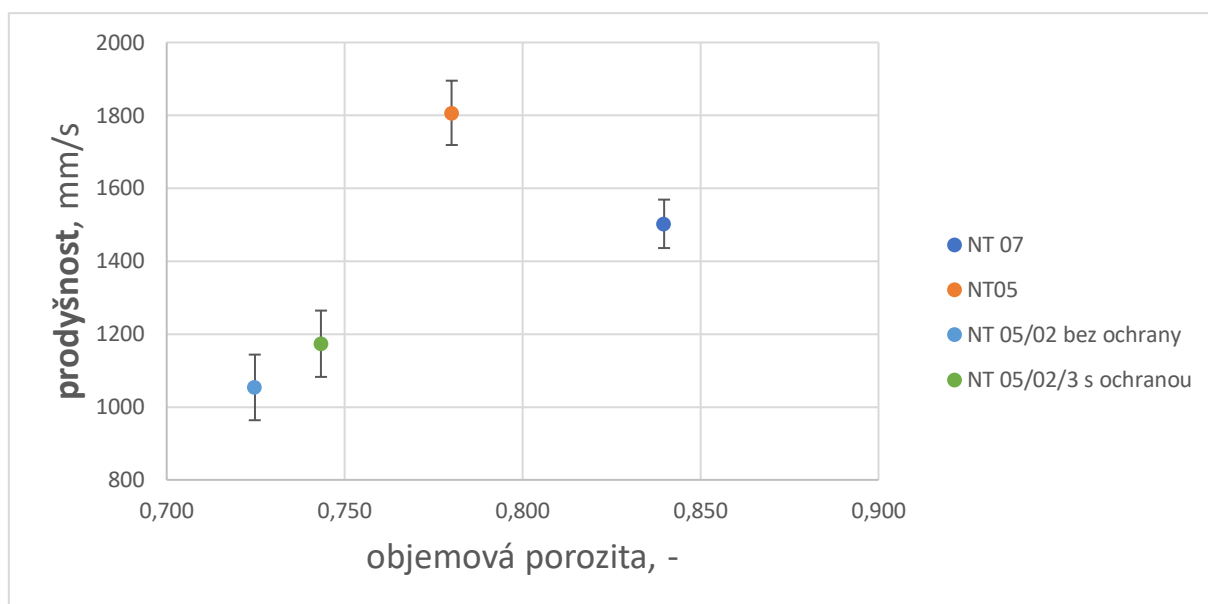
Měření probíhalo za stejných podmínek, jako u 1. skupiny (viz kapitola 3.1.2). Výsledky měření jednotlivých vrstev, kombinací termoizolačních vrstev a sendvičů jsou uvedené v tab.18-19 a na obr.38-39.

A) Jednotlivé vrstvy

Tab. 18 Prodyšnost vzduchu jednotlivých vrstev

Název vzorku	Prodyšnost vzduchu R [mm/s]	Spodní mez IS [mm/s]	Horní mez IS [mm/s]
NT 05/02 bez ochrany	1053,7	963,7	1143,7
NT 05/02/3 s ochranou	1173,5	1082,5	1264,5
PL 07	7860	7707,4	8012,6

Komerční vzorky MILIFE prokazují nižší hodnoty prodyšnosti ve srovnání s laboratorními a zároveň i nižší hodnoty objemové porozity (viz obr.38).



Obr. 38 Porovnání prodyšnosti MILIFE z 1. a 2. skupiny

B) Kombinace termoizolačních vrstev a sendviče

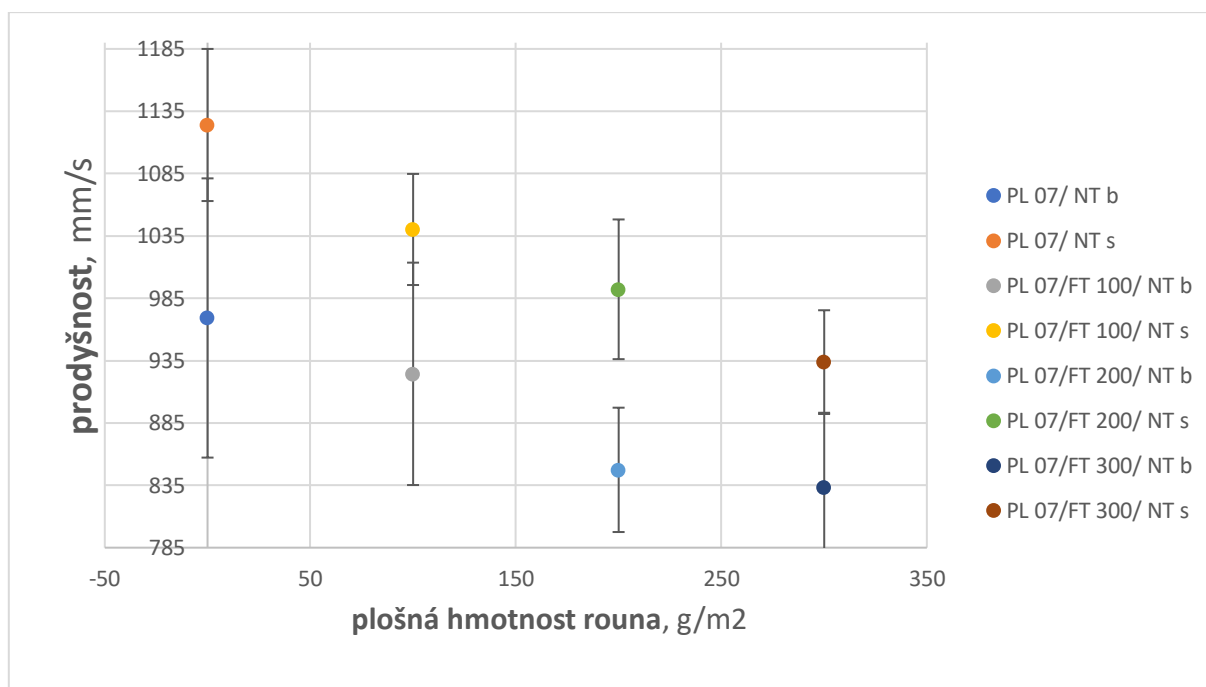
Kombinace termoizolačních vrstev s podšívkou byly měřeny v obou směrech průchodu vzduchu. Směr A označuje tok vzduchu od rouna k podšívce, směr B označuje tok vzduchu od podšívky k rounu. NT 05/02 je označena jako NT b (bez ochrany), NT 05/02/3 je označena jako NT s (s ochranou). Výsledky jsou uvedené v tab.19 a na obr.39.

Tabulka 19 Prodyšnost vzduchu kombinací termoizolačních vrstev a sendvičů

Název kombinace/sendviče	Prodyšnost vzduchu R [mm/s]	Spodní mez IS [mm/s]	Horní mez IS [mm/s]
PL 07/FT 100_A	5048	4915	5181
FT 100/PL 07_B	5016	4720	5312
PL 07/FT 200_A	3842	3774	3910
FT 200/PL 07_B	3780	3653	3907
PL 07/FT 300_A	2866	2836	2896
FT 300/PL 07_B	2818	2762	2874
PL 07/FT 400_A	2538	2495	2581
FT 400/PL 07_B	2492	2402	2582
PL 07/ NT b	969	857	1081
PL 07/ NT s	1124	1063	1185
PL 07/FT 100/ NT b	924	835	1014
PL 07/FT 100/ NT s	1040	996	1085
PL 07/FT 200/ NT b	847	798	897
PL 07/FT 200/ NT s	992	936	1048
PL 07/FT 300/ NT b	834	774	893
PL 07/FT 300/ NT s	934	892	975
3A 100	107	100	113
3A 200	152	150	153
3A 300	167	164	170



U souprav s MILIFE NT 05/02/3 s ochranou prodyšnost nabývá větších hodnot, ale jak je vidět z grafu, rozdíl je statisticky významný pouze v kombinaci s rounem FT 200 (viz obr.39).



Obr. 39 Porovnání prodyšnosti MILIFE s ochranou a bez v kombinaci s ostatními vrstvami



3.2.3 Měření tepelné vodivosti, tepelného odporu a výpočet clo vybraných sendvičů

Měření vybraných sendvičů probíhalo při běžně nastavených parametrech přístroje s přtlakem $P=200$ Pa, při teplotě vzduchu v laboratoři $t=20,1-19,3$ °C a vlhkosti vzduchu $\varphi=40$ %. Výsledky měření jsou uvedené v tab.20.

Tab.20 Výsledky měření vybraných sendvičů

Název soupravy	Měrná tepelná vodivost λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	SM IS λ	HM IS λ	Plošný odpor vedení tepla R_t [W^{-1}Km^2]	SM IS R_t	HM IS R_t	Izolace I_c [clo]
2A 100	0,0435	0,0431	0,0439	0,1437	0,1406	0,1468	0,927
2B 100	0,0995	0,027	0,2056	0,1576	0,1549	0,1602	1,0168
2A 200	0,0554	0,0551	0,0558	0,2708	0,2631	0,2785	1,7471
2B 200	0,0552	0,0541	0,0564	0,2706	0,2645	0,2767	1,7458

Hodnoty měrné tepelné vodivosti a plošného odporu vedení tepla jsou na stejné úrovni, jako u analogických sendvičů z 1. skupiny (viz kap.3.1.3).

3.2.4 Měření reflektance, transmitance a výpočet absorbance

Měření probíhalo za stejných podmínek, jako u 1. skupiny.

A) Jednotlivé vrstvy

Výsledky měření jsou uvedené v tab.21-22 a na obr. 40-41.

Tabulka 21 Výslední hodnoty pro vylepšené vrstvy MILIFE a podšívky

Složka	Reflektance odrazivost ρ [-]	SM IS	HM IS	Transmitance propustnost τ [-]	SM IS	HM IS	Absorbance pohltivost α [-]
NT 05/02 b	0,564	0,497	0,635	0,169	0,093	0,244	0,267
NT 05/02/3 s	0,530	0,430	0,629	0,108	0	0,281	0,362
PL 07	0,076	0,068	0,083	0,044	0	0,419	0,881



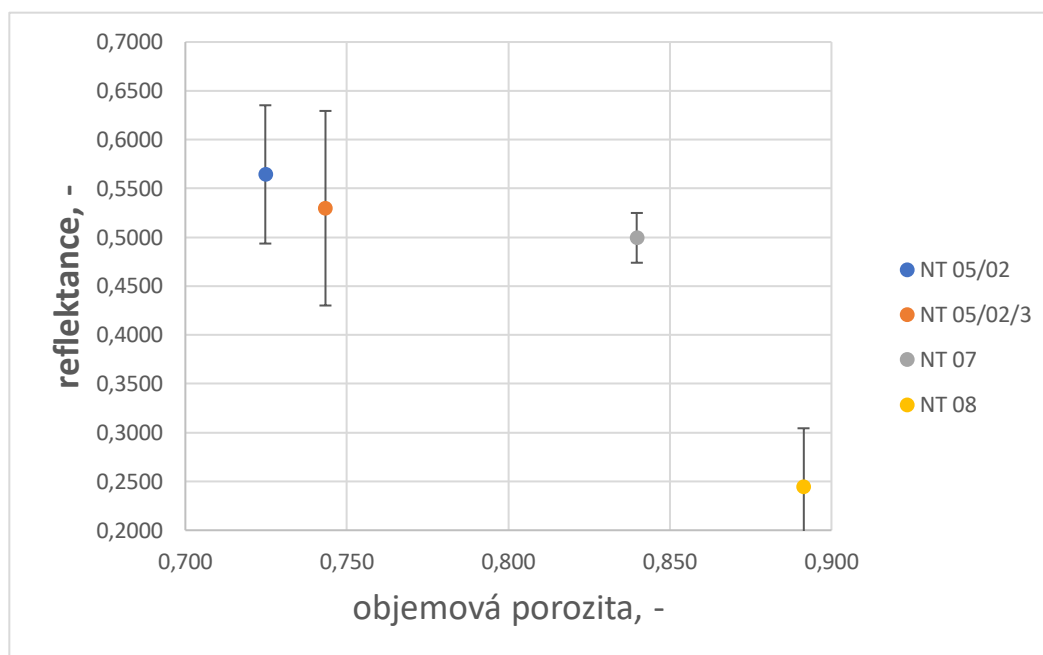
MILIFE ve srovnání s 1. skupinou prokazují vyšší hodnoty reflektance při stejné plošné hmotnosti. Podšívková pletenina má o 30 % menší plošnou hmotnost, než v 1. skupině, ale větší hodnotu reflektance (viz tab.22).

Tabulka 22 Porovnání vrstev 2. skupiny s analogickými vrstvami 1. skupiny

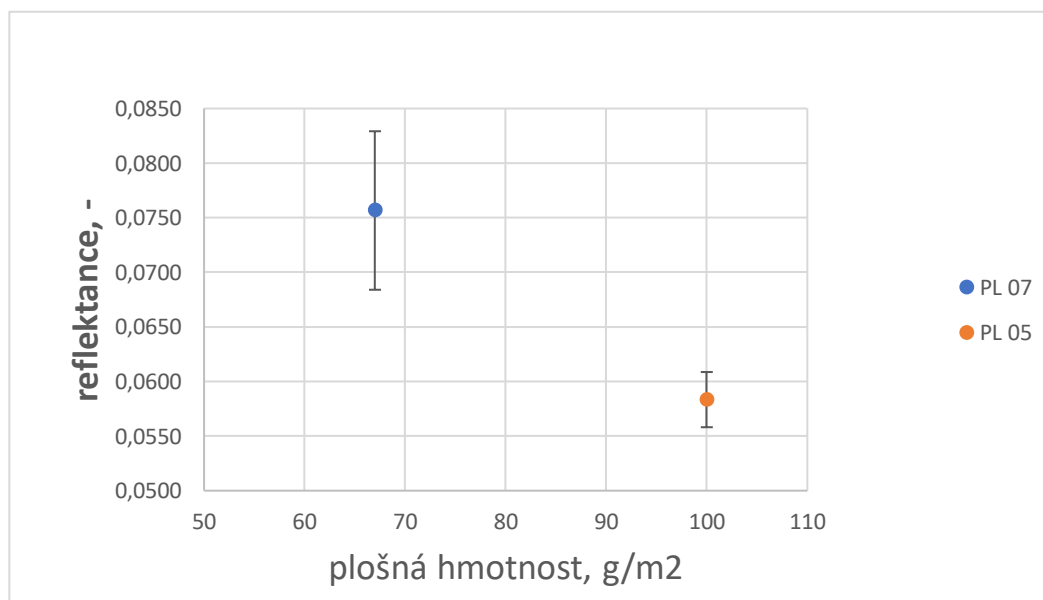
Název vrstvy	Reflektance odrazivost ρ [-]	Transmitance propustnost τ [-]	Absorbance pohltivost α [-]
MILIFE			
NT 05/02 b	0,564	0,169	0,267
NT 05/02/3 s	0,530	0,108	0,362
NT 07 pokov., 30 g/m ²	0,499	0,309	0,191
NT 08 režná, 10 g/m ²	0,245	0,441	0,314
Podšívka			
PL 07	0,076	0,044	0,881
PL 05	0,058	0,281	0,661



Jak je patrné z grafů (viz obr.40 a 41), zvýšení reflektance MILIFE nemá statistický význam. U podšívky došlo k výraznému a statisticky významnému zvětšení hodnoty reflektance.



Obrázek 40 Porovnání vrstev 2. skupiny s analogickými vrstvami 1. skupiny



Obrázek 41 Porovnání reflektance podšívky z 1. a 2. skupin

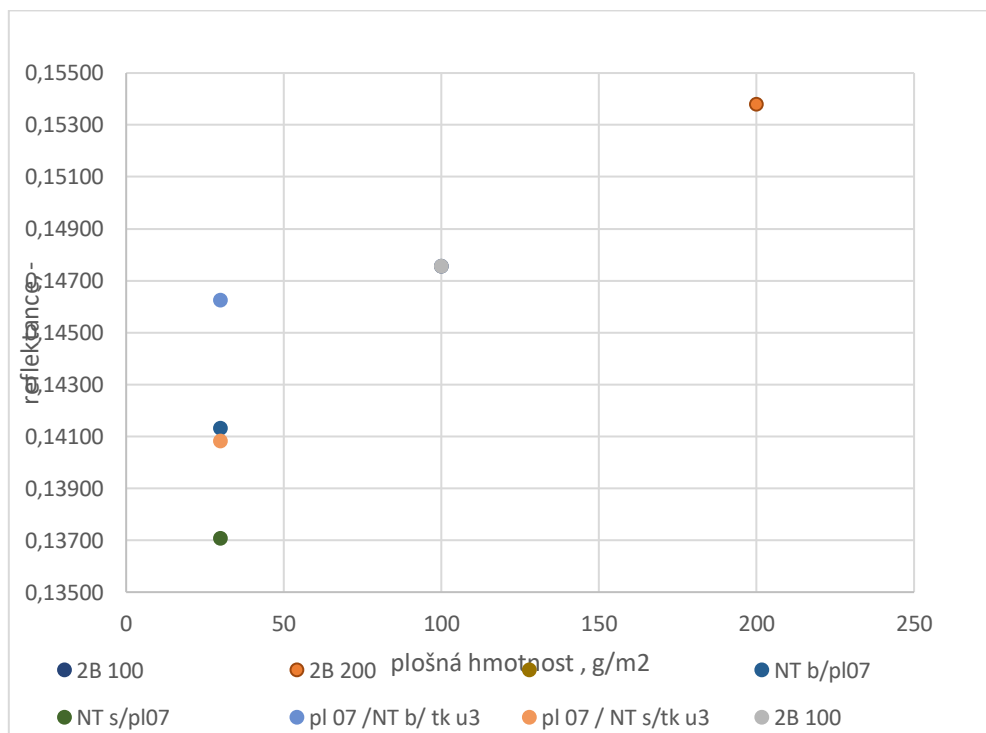


B) Kombinace termoizolačních vrstev a sendviče

Výsledky měření kombinací termoizolačních vrstev a sendvičů jsou znázorněné v tab.23 a na obr. 42.

Tab. 23 Výsledky měření reflektance kombinací termoizolačních vrstev a sendvičů

Název sendviče	Reflektance ρ [-]	Spodní mez IS	Horní mez IS
FT 100/PL 07	0,0760	0,0714	0,0806
FT 200/PL 07	0,0785	0,0737	0,0832
FT 300/PL07	0,0738	0,0560	0,0916
FT 400/PL 07	0,0742	0,0695	0,0789
NT b/PL07	0,1413	0,1276	0,1550
NT s/PL07	0,1371	0,1138	0,1603
PL 07/FT 100/ NT b	0,0732	0,0719	0,0745
PL 07/ FT 200/ NT b	0,0710	0,0672	0,0749
PL 07 / NT b/ TK U3	0,1462	0,1339	0,1586
PL 07 / NT b /FT 100	0,1510	0,1505	0,1516
PL 07 / NT s /TK U3	0,1408	0,1357	0,1459
2A 100	0,0725	0,0688	0,0762
2A 200	0,0715	0,0698	0,0731
2B 100	0,1476	0,1433	0,1518
2B 200	0,1538	0,1527	0,1548
3B 300	0,1255	0,1184	0,1325



Obr.42 Závislost reflektance sendvičů 2. skupiny na plošné hmotnosti termoizolační složky



DISKUSE

Z výsledků vyplývá, že nejvyšší hodnoty reflektance prokazují sendviče 2B 200 s $\rho=0,154$ a 2B 100 s $\rho=0,148$. Jsou to sendviče typu B, čili vrstva MILIFE se nachází mezi podšívkou a rounem. V 1. skupině nejlepší výsledky mají analogické soupravy (8B 2*100 s $\rho=0,110$ a 8B 100 s $\rho=0,104$).

Daný experiment byl zaměřen i na porovnání odrazivosti souprav s MILIFE a rounem a souprav s pouze MILIFE v roli termoizolační složky. Jak je patrné z obr.7, samotná vrstva MILIFE v určitých případech prokazuje lepší odrazivost než v kombinaci s rounem. Například, sendvič 3B 300 má $\rho=0,1255$, a při odstranění rouna souprava PL 07 + 05/02/3 + TK U3 má $\rho=0,1408$. Toto pozorování je zajímavé hlavně z hlediska izolace radiační složky přestupu tepla.

DÍLČÍ ZÁVĚR 2. SKUPINA

Na základě výsledků měření 1. skupiny laboratorních vzorků byla vyvinuta 2. skupina komerčních vzorků s cílem vylepšit odrazivou schopnost sendvičů.

Z hlediska fyzikálních vlastností, MILIFE z 2. skupiny prokazují nižší hodnoty prodyšnosti ve srovnání s 1. skupinou a zároveň i nižší hodnoty objemové porozity.

Hodnoty měrné tepelné vodivosti a plošného odporu vedení tepla jsou na stejné úrovni, jako u analogických sendvičů z 1. skupiny.

MILIFE ve srovnání s 1. skupinou prokazují vyšší hodnoty reflektance při stejné plošné hmotnosti. Podšívková pletenina má o 30 % menší plošnou hmotnost, než v 1. skupině, ale větší reflektance. Což vede k celkovému zvýšení odrazivosti soupravy.

Z výsledků vyplývá, že nejvyšší hodnoty reflektance vykazují sendviče 2B 200 s $\rho=0,154$ a 2B 100 s $\rho=0,148$. Jsou to sendviče typu B čili vrstva MILIFE se nachází mezi podšívkou a rounem, stejně jako v optimálním sendviči z 1. skupiny.

Jako výslední optimální sendvič lze považovat sendvič, který se skládá z podšívky PL 07 s $m_s=67 \text{ g/m}^2$, vrstvy MILIFE NT 05/02/3 s $m_s=30 \text{ g/m}^2$, rounem FT 200 s $m_s=200 \text{ g/m}^2$ a vrchovou vrstvou TK U3 v uvedeném pořadí čili je to sendvič typu B. Při snaze zvýšit celkový tepelný odpor soupravy, je doporučeno použít rouno o vyšší plošné hmotnosti FT 300.



ZÁVĚR

Hlavním cílem experimentální části bylo stanovení vhodného složení sendviče s optimálními hodnotami tepelně izolačních parametrů při vhodné tloušťce sendviče. Cílem bylo také nalézt optimální pořadí reflexních a izolačních vrstev ve směru tepelného toku.

Byly měřeny dvě šarže vzorků – 1. skupina s laboratorními vzorky MILIFE a 2. skupina s komerčními vzorky MILIFE, vyvinutými na základě laboratorních. Předpokládalo se, že komerční vzorky MILIFE budou vykazovat vyšší odrazivost a odolnost proti oděru. U obou skupin byly měřeny fyzikální parametry, prodyšnost vzduchu, tepelná vodivost, tepelný odpor, reflektance, transmitance a absorbance. U první skupiny byly navíc měřeny emisivita a stupeň izolace radiační složky přestupu tepla.

Cíl práce byl splněn, bylo prokázáno, že 2. skupina opravdu má zlepšenou odrazivost elektromagnetického vlnění. Uživatelské vlastnosti byly zkoumány v jiném experimentu [48]. Komerční MILIFE s ochrannou vrstvou vykazují zvýšenou trvanlivost a parametry komfortu.

Z hlediska tloušťky izolačních vrstev je vhodné použít dva tenčí rouna s celkovou plošnou hmotností 200 nebo 300 g/m² a vrstvu pokovené MILIFE s ochranou.

Doporučené pořadí je MILIFE-rouno ve směru tepelného toku.

V dalších experimentech je možné použití textilií s hliníkovým zátěrem nebo použít více vrstev MILIFE v různých pozicích v jednom sendviči, což ale sníží prodyšnost a zároveň i komfort. Je potřeba zkoumat změnu vlastností sendvičů po laminování, zejména ověřovat tepelné vlastnosti, měřit propustnost vodních párů, trvanlivost a komfort.



Seznam použité literatury

1. TONG, Jiahui a Li LI. Thermal Regulation of Electrically Conducting Fabrics. TAO, Xiaoming, ed. Handbook of Smart Textiles [online]. Singapore: Springer Singapore, 2015, 2015-7-2, s. 689-718 [cit. 2018-06-10]. DOI: 10.1007/978-
2. WILLIAMS, J. Textiles for cold weather apparel [online]. Boca Raton: CRC Press, 2009. [cit. 2018-06-16]. ISBN 978-1-84569-411-1. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9781845694111>
3. LI, Y. a J. M. LAYTON. The science of clothing comfort: a critical appreciation of recent developments. Manchester: Textile Institute International, 2001. ISBN 1-870372-24-7. ISSN 0040-5167(brož.).
4. HES, Luboš a Petr SLUKA. Úvod do komfortu textilií. Liberec: Technická univerzita, 2005. ISBN 80-7083-926-0.
5. MÄKINEN, H. a K. JUSSILA. Cold-protective clothing: types, design and standards. Protective Clothing. Elsevier, 2014, 2014, s. 3-38. DOI: 10.1533/9781782420408.1.3. ISBN 9781782420323.
6. A. K. HAGHI. Heat and mass transfer in textiles. 2nd ed. Montreal: WSEAS Press, 2011. ISBN 9781618040251
7. HALLIDAY, D., Resnick, R., Walker, J.: Fyzika, VUT, Brno, 2000
8. Přenos tepla. [online], 2013, [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: <http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FYSV/PrenosTepla.pdf>
9. Tepelné a akustické vlastnosti stavebních materiálů. [online], 2012, [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaskaIII_IZMA.pdf
10. Manuál k přístroji Thermal Conductivity Analyzer TCi – Model C-Therm TCi, TUL, Liberec, 2013
11. Termovize: Termovizní měření - teorie [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: <http://www.termovize.com/termovizni-mereni-teorie>
12. ŠUBERT, Radim. Hodnocení tepelně-izolačních vlastností textilií při vyšších rychlostech proudění vzduchu. Liberec, 2007. Disertační. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Zdeněk Kůs.
13. Zdeněk KŮS, Andrea HALASOVÁ, Radim ŠUBERT, Michal KOTEK a Václav KOPECKÝ. Methods of textiles evaluation at extreme wind condition - model of wind. Strutex. 2005, šest.
14. Simon ANNAHEIM, Li-chu WANG, Agnieszka PSIKUTA, Matthew Patrick Morrissey Martin Alois Camenzind René Michel Rossi , (2015),"A new method to



- assess the influence of textiles properties on human thermophysiology. Part I",
International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 27 Iss 2 pp. 272 – 282
15. PSIKUTA, Agnes, Reto NIEDERMANN a René M. ROSSI. Effect of ambient temperature and attachment method on surface temperature measurements. International Journal of Biometeorology [online]. 2014, 58(5), 877-885 [cit. 2018-09-29]. DOI: 10.1007/s00484-013-0669-4. ISSN 0020-7128. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00484-013-0669-4>
16. KUBEČEK, Tomáš. Vliv teploty na tepelné ztráty textilií: Influence of temperature on thermal loss of textiles. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016.
17. HUNTOŠOVÁ, Katarína. Porovnání vybraných přístrojů pro měření tepelné složky termofyziologického komfortu: Comparison of selected instruments for measuring of thermal components thermophysical comfort. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016.
18. SZEPESIOVÁ, Tereza. Srovnávací analýza metod pro zjišťování tepelně izolačních vlastností: Comparative analysis methods for detecting thermal insulation properties. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015.
19. MAROLLEAU, A, F SALAUN, D DUPONT, H GIDIK a S DUCEPT. Influence of textile properties on thermal comfort. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2017, 254 [cit. 2018-09-29]. DOI: 10.1088/1757-899X/254/18/182007. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1757899X/254/i=18/a=182007?key=crossref.73b04166ba5b62b414e42568872e3642>
20. Heat Transfer by Radiation [online]. Retrieved 30 November 2019, Dostupné z: <http://vlab.amrita.edu/?sub=1&brch=194&sim=802&cnt=1>
21. SHISHOO, Roshan. Textiles in sport. Boca Raton, FL: CRC, 2005. ISBN 9781855739222., 262-286.
22. Norma BS EN 342. PROTECTIVE CLOTHING - ENSEMBLES AND GARMENTS FOR PROTECTION AGAINST COLD British Standards Institution, 2004
23. THWAITES, C. (2008), Cold weather clothing, in E. Wilusz (ed.), Military Textiles, Cambridge, Woodhead, pp. 158-182.
24. SHAPCC (1998), The Health Aspects of Work in Extreme Climates within the E & P Industry: The Cold. Health Subcommittee Report No. 6.65/270, London: E & P Forum.
25. Norma ISO 7730. Ergonomics of the thermal environment, 2005
26. Definition of ripstop [online]. <https://www.definitions.net/definition/Ripstop>
27. Norma ČSN EN ISO 9237. Textilie. Zjišťování prodyšnosti plošných textilií, 1996.
28. <https://www.noe.jxtg-group.co.jp/english/company/rd/intro/function/powder.html>
29. Rouna Flexoterm [online]. <https://www.polytex.eu/material/flexoterm/>
30. Norma interní č. 23-304-02/01. Měření tepelných vlastností na přístroji Alambeta, 2002.
31. Norma ČSN EN ISO 139 (800056). Textilie. Normální ovzduší pro klimatizování a zkoušení, 2005.



32. MidIRPDS1313 Integrating sphere: Product data sheet, 2013. Dostupné z: www.piketech.com
33. Emissivity values. Dostupné z: <https://www.optotherm.com/emiss-table.htm>
34. Table of emissivity of various surfaces. Dostupné z: http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf
35. Emissivity values for metals. Dostupné z: <https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/emissivity-metals>
36. <http://www.deeplook.ir>
37. WALTHAM, MA. Protective clothing: managing thermal stress.: Woodhead Pub., 2014.
38. HSU, P.-C. et al. Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile. *Science* 353, 1019–1023 (2016).
39. HARDY, J. D. & DuBois, E. F. Regulation of heat loss from the human body. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 23, 624–631 (1937).
40. HAYES, S. G. & Venkatraman, P. *Materials and Technology for Sportswear and Performance Apparel* (CRC Press, 2015).
41. TONG, J. K. et al. Infrared-transparent visible-opaque fabrics for wearable personal thermal management. *ACS Photonics* 2, 769–778 (2015).
42. CAI, Lili, Alex Y. SONG, Peilin WU, et al. Warming up human body by nanoporous metallized polyethylene textile. *Nature Communications* [online]. 2017, 8(1) [cit. 2020-01-01]. DOI: 10.1038/s41467-017-00614-4. ISSN 2041-1723. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/s41467-017-00614-4>.
43. KŘEMENÁKOVÁ, D. a kol.: Computer-aided textile design ‘LibTex’. *Indian Journal of Fibre & Textile Research* Vol. 33, December 2008, pp.
44. KŘEMENÁKOVÁ, Dana, Jiří MILITKÝ a Jaroslav ŠESTÁK. Vlákenné struktury pro speciální aplikace. Kanina: O.P.S., 2013. ISBN 978-80-87269-32-9, s.121-131
45. BASUK M.: Improving the Performance of Human Body with Far Infra-Red Rays Reflecting Textiles, *Curr. Trends Fashion Technol Textile Eng.* 4, Issue 3 - October 2018 DOI: 10.19080/CTFTTE.2018.04.555640
46. <http://www.invista.com/en/brands/thermolite.html>
47. www.toyobo-global.com/seihin/ap/moiscare/moiscare.html
48. KŘEMENÁKOVÁ D., Militký J., Novosad A., Venkataraman M., Večerník J. Textile Layers Enabling Back Reflection of Human Body Thermal Radiation. 47th Textile Research Symposium, 2019.
49. Norma ČSN EN ISO 7726. Ergonomie tepelného prostředí – Přístroje pro měření fyzikálních veličin, 1998.
50. Norma TNI CEN/TR 16422. Klasifikace termoregulačních vlastností, 2014
51. CUNNINGTON G. R. and Lee S. C.: Radiative Properties of Fibrous Thermal Insulation, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 10, No. 3, 1996, pp. 460–466.
52. Fan J., and Hunter L.: *Engineering apparel fabrics and garments*, Woodhead Publishing, Cambridge 2009
53. MODEST M. F.: *Radiative heat transfer*, Academic Press, 2013
54. Dana Křemenáková, Jiří Militký, Kai Yang, Mohanapryia Ventakaraman, Josef Večerník, Veronika Tunáková, Guocheng Zhu, Juming Yao Multifunctional Effects of Copper/Nickel Nano Coated Lightweight Nonwovens. NART 2019
55. DAS, A. a R. ALAGIRUSAMY. *Science in clothing comfort*. New Delhi: Woodhead Publishing India Pvt, 2010. ISBN 1845697898.